



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MECHANIKY TĚLES, MECHATRONIKY A
BIOMECHANIKY**

INSTITUTE OF SOLID MECHANICS, MECHATRONICS AND BIOMECHANICS

**PASIVNÍ KOMPENZACE TEPLOTNÍCH DEFORMACÍ U
OBRÁBĚCÍHO STROJE**

PASSIVE COMPENSATION OF A THERMAL DEFORMATION FOR A MACHINE TOOL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Šabart

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Dominik Hermanský

BRNO 2017

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky
Student: Bc. Adam Šabart
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství
Studijní obor: Inženýrská mechanika a biomechanika
Vedoucí práce: Ing. Dominik Hermanský
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Pasivní kompenzace teplotních deformací u obráběcího stroje

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pasivní kompenzace teplotních deformací u obráběcích strojů slouží k zmírnění nežádoucích efektů při teplotním zatěžování stroje. Cílem je upravit topologii, případně materiálové provedení nosné struktury stroje, resp. konstrukčně upravit další uzly stroje a jejich rozmístění na stroji (pohony, kuličkové šrouby, kotvení stroje...).

Cíle diplomové práce:

- Řešení v oblasti teplotních chyb u obráběcích strojů
- Detailní popis možností pasivních kompenzací
- Výběr kinematiky stroje, na kterém realizována praktická úloha
- Výpočtový model stroje za účelem optimalizace
- Optimalizační kroky
- Závěr, doporučení

Seznam literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

BORSKÝ, Václav a Jiří MAREK. Základy stavby obráběcích strojů. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1986. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.

JANÍČEK, Přemysl a Emanuel ONDŘÁČEK. Řešení problémů modelováním: téměř nic o téměř všem. Vyd. 1. Brno: PC-DIR, 1998. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-1233-X.

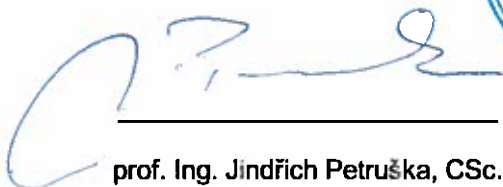
JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. Expertní inženýrství v systémovém pojetí: téměř nic o téměř všem. 1. vyd. Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.

[www stránky výrobců obráběcích strojů](http://www.stranky.vyrobcu.obrabecich.strojů)

www.mmspektrum.com

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17.

V Brně, dne 4. 11. 2016



prof. Ing. Jindřich Petruška, CSc.
ředitel ústavu



doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá pasivní kompenzací teplotních deformací u příčniku portálového obráběcího centra. Problém je řešen pomocí výpočtového modelování s využitím metody konečných prvků v prostředí programu ANSYS Workbench. Dále je využito matematické optimalizace (taktéž v programu ANSYS Workbench) k nalezení takových parametrů příčniku, aby byly sníženy teplotní deformace a jeho hmotnost byla minimalizována. Výstupem jsou dvě nové verze příčniku, které jsou porovnány s původní konfigurací.

Abstract

This master thesis deals with passive compensation of a thermal deformation for a binder of portal machining center. The problem is solved by computational modeling with finite element method using ANSYS Workbench software. Afterwards mathematical optimization (also using ANSYS Workbench software) is used for finding binder parameters in order to reduce thermal deformation and its weight. The output is two new versions of binder which are compared to the original configuration.

Klíčová slova

Obráběcí stroj, teplotní chyba, metoda konečných prvků, ANSYS, pasivní kompenzace teplotních deformací

Keywords

Machine-tool, thermal error, finite element method, ANSYS, passive compensation of a thermal deformation

Bibliografická citace práce

ŠABART, A. *Pasivní kompenzace teplotních deformací u obráběcího stroje*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Dominik Hermanský.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod vedením Ing. Dominika Hermanského s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 20. května 2017

.....
Bc. Adam Šabart

Poděkování

Děkuji Ing. Dominikovi Hermanskému za pomoc, cenné rady a ochotu, jež mi poskytl při vypracování této práce. Poděkování patří taktéž mé rodině za podporu během celého studia.

Obsah

1. ÚVOD	15
2. SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE.....	16
2.1. Problémová situace	16
2.2. Formulace problému	16
2.3. Formulace cílů a řešení.....	16
2.4. Popis řešené soustavy.....	16
2.5. Systém podstatných veličin	18
2.6. Výběr metody řešení, volba softwaru a hardwaru.....	20
3. REŠERŠNÍ STUDIE	21
3.1. Teplotní problémy u obráběcích strojů.....	21
3.1.1. Klasifikace teplotních problémů u obráběcích strojů	21
3.1.2. Teplotní deformace	23
3.2. Termomechanika	25
3.2.1. Termodynamika	25
3.2.2. Přenos tepla.....	26
3.2.3. Rovnice vedení tepla.....	28
3.3. Metoda konečných prvků.....	29
3.3.1. Úvod.....	29
3.3.2. Teplotní napjatost.....	30
3.4. Redukce teplotních chyb u obráběcích strojů	31
3.4.1. Konstrukce obráběcího stroje redukující tepelný tok (pasivní kompenzace)	32
3.4.2. Kontrola teplot obráběcího stroje a jeho okolí	33
3.4.3. Kompenzace teplotních chyb (aktivní kompenzace).....	33
3.5. Teplotní chyby a příklad jejich odstranění.....	35
4. PRAKTICKÁ ÚLOHA	37
4.1. Tvorba výpočtového modelu Var_1	37
4.1.1. Model geometrie	37
4.1.2. Model materiálů	40
4.1.3. Model vazeb	40
4.1.4. Kontakty.....	43
4.1.5. Model zatížení.....	44
4.1.6. Síť konečných prvků	45
4.2. Nastavení analýz	47
4.3. Výsledky zatěžování modelu Var_1.....	49

4.4.	Pasivní kompenzace deformací modelu Var_1	52
4.5.	Výpočtový model Var_3	57
4.6.	Výsledky, porovnání, doporučení	59
5.	ZÁVĚR	66
POUŽITÉ ZDROJE		67
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ		69
SEZNAM OBRÁZKŮ		71
SEZNAM TABULEK		73

1. ÚVOD

Diplomová práce se zabývá řešením problému z oblasti obráběcích strojů. V posledních desetiletích došlo v této oblasti k významnému pokroku. Výrazný podíl na tom má zapojení výpočetní techniky do řízení a samotného návrhu konstrukcí obráběcích strojů. Dnes je již zcela běžné, ne-li nezbytné, používání CAD a CAE programů při navrhování téměř všech technických děl. Díky rozvoji těchto technologií vznikl nový způsob navrhování – *virtual prototyping*. Konstruktor si tak může nakreslit virtuální model v CAD programu a před započítím výroby zjistit pomocí simulací v CAE softwaru jeho chování a vlastnosti. Jedním z CAE programů je ANSYS, který využívá metodu konečných prvků k simulacím v nejrůznějších inženýrských oblastech jako je statika, dynamika, elektromagnetické pole, proudění tekutin a také určování teplotního pole. Právě již zmiňovaný program ANSYS je využit při návrhu nové varianty příčnicku obráběcího stroje. Předmětem zájmu se stalo jeho teplotní chování, které je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících výrobní přesnost celého stroje. Cílem diplomové práce je tedy navrhnout nové řešení příčnicku, které bude při teplotním zatěžování vykazovat nižší deformace.

K vyřešení daného problému je třeba porozumět zákonitostem a principům, které s danou problematikou souvisí. Z toho důvodu je v práci zhotovena rešeršní studie, kde jsou uvedeny základní poznatky týkající se teplotních problémů u obráběcích strojů, teorie termomechaniky, princip metody konečných prvků (u deformačně-napjatostních a teplotních úloh) a dále metody používané k redukci teplotních chyb u obráběcích strojů.

Následuje kapitola zabývající se tvorbou výpočtového modelu příčnicku. Výpočtový model je určený pro analýzu teplotně-deformačního chování příčnicku a jeho optimalizaci vedenou za účelem snížení deformací během teplotního zatěžování. Na závěr jsou dvě nově získané varianty příčnicku porovnány s původní.

2. SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE

2.1.Problémová situace

Během teplotního zatěžování obráběcího stroje vznikají nežádoucí deformace, jež negativně ovlivňují přesnost obráběcího procesu. Požadavky výrobců na přesnost obrábění se stále zvyšují, proto je třeba tyto deformace minimalizovat, čehož lze dosáhnout několika způsoby. Jedním z nich je pasivní kompenzace těchto deformací, která spočívá v úpravě topologie, materiálového provedení, případně v úpravě umístění konstrukčních uzlů.

2.2.Formulace problému

Snížení deformací vybrané části obráběcího stroje vzniklých teplotním zatěžováním pomocí pasivní kompenzace.

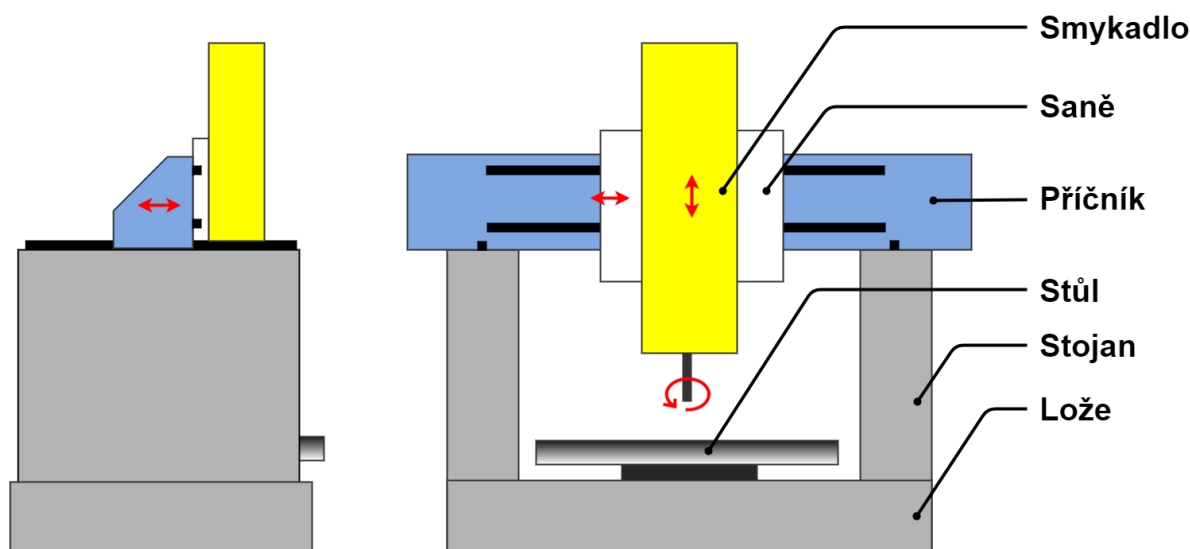
2.3.Formulace cílů a řešení

Cíle diplomové práce jsou následující:

- Výběr kinematiky stroje, na které je realizována praktická úloha.
- Výpočtový model zvolené části stroje za účelem optimalizace.
- Optimalizační kroky.
- Závěr, doporučení.

2.4. Popis řešené soustavy

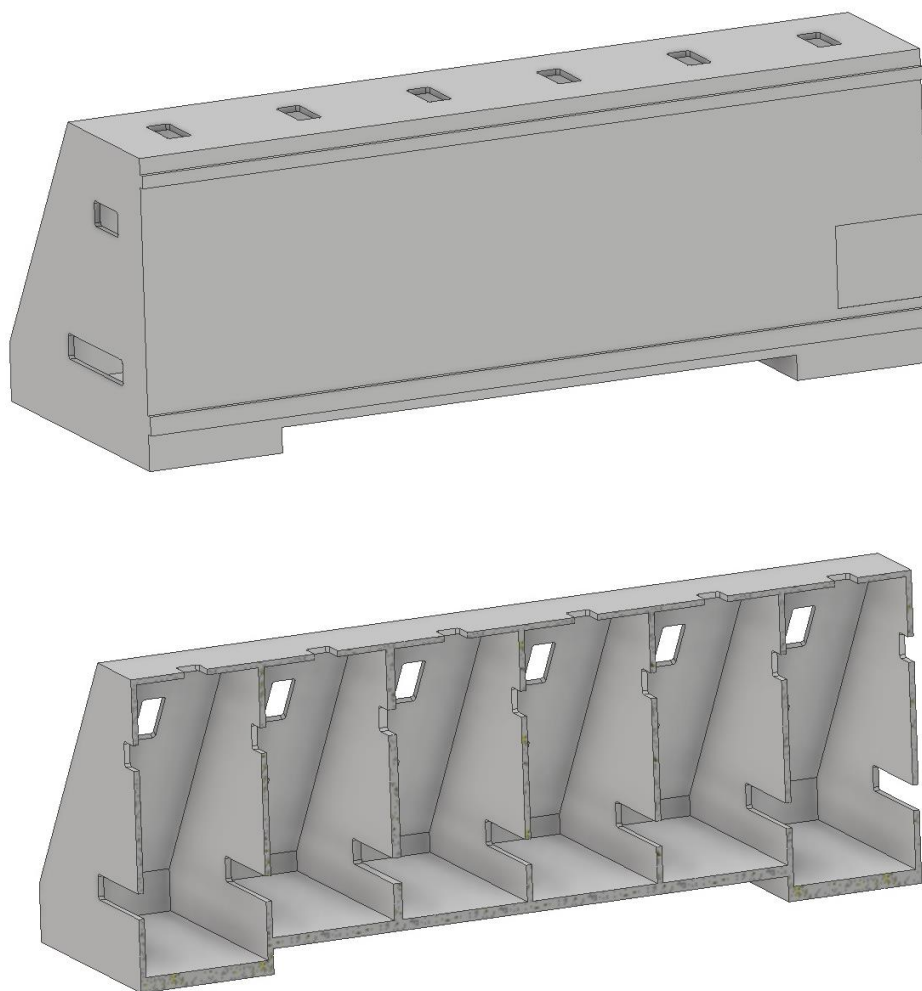
Praktická část diplomové práce se zabývá tvorbou výpočtového modelu zvolené části obráběcího stroje za účelem řešení problému, který je popsán v kapitole 2.2. Modelový objekt je portálové obráběcí centrum typu horní gantry (viz obrázek 2.1). Toto obráběcí centrum se skládá z několika elementárních částí (viz obr. 2.1).



Obr. 2.1: Schéma obráběcího centra s popisem hlavních částí.

Veškeré pohyby stroje jsou zprostředkovány pomocí lineárních vedení s valivými elementy a kuličkových šroubů. Všechny potřebné podklady byly získány díky spolupráci se společností Intemac Solutions s.r.o.

Po konzultaci s vedoucím práce byl pro pasivní kompenzaci zvolen příčník obráběcího centra zobrazený na obrázcích 2.2 a 2.3. Základem příčníku je šestistěn s lichoběžníkovým průřezem se stěnami o tloušťkách 16, 30 a 40 mm, který je vyztužen 5 žebry o tloušťce 16 mm. Některé stěny mají odlehčovací otvory, které zároveň umožňují cirkulaci vzduchu.



Obr. 2.2: Pohled na příčník zepředu (nahore) a příčník v řezu (dole).

2.5. Systém podstatných veličin

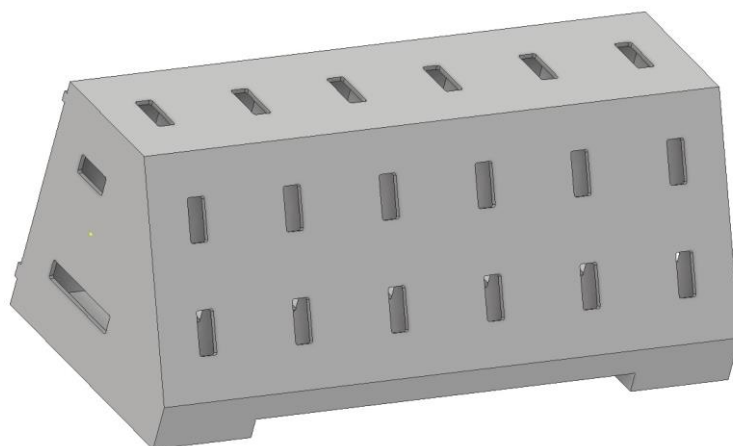
Systém podstatných veličin by měl obsahovat všechny veličiny, které popisují podstatné okolnosti z hlediska řešení problému. Je rozdělen do devíti podmnožin (S0-S8), které jsou popsány v bodech níže. Zanedbání některé z podstatných veličin je základní chyba modelování a vede k nesprávným výsledkům. [1]

- **S0 – veličiny popisující okolí entity**

Příčník obráběcího stroje je obklopen vzduchem, ten je popsán určitou proměnnou teplotu a určitým koeficientem přestupu tepla vzhledem k příčníku. Teplota vzduchu je v čase i prostoru proměnná. Výpočtový model zohledňuje pouze časovou proměnnost teploty.

- **S1 – geometrie a topologie entity**

Modelovaná entita je trojrozměrný objekt, jehož model geometrie byl vytvořen na základě obdržených podkladů. Tato podmnožina je tedy popsána pomocí celkových rozměrů, tloušťek stěn a rozměrů otvorů.



Obr. 2.3: Zadní pohled na příčník.

- **S2 – vazby a interakce entity s okolím**

Entita je vázána ke stojanům obráběcího stroje lineárními vedeními a kuličkovými šrouby. Tuhosti lineárních vedení mají slabě nelineární charakteristiku, závislost však bude zjednodušena jako lineární. Tuhost kuličkového šroubu je stanovena výpočtem.

- **S3 – aktivace entity s okolím**

Příčník obráběcího stroje je ovlivňován změnami teplot okolního vzduchu a teplem generovaným pohony. Toto zatěžování bude modelováno experimentálně získanými hodnotami.

- **S4 – ovlivňování entity s okolím**

Prázdná množina.

- **S5 – oborové vlastnosti struktury entity**

Entita je vyrobena z materiálu EN-GJS-500-7, který je popsán následujícími charakteristikami získanými z ČSN 42 2305: modul pružnosti v tahu, hustota, tepelná vodivost, modul pružnosti ve smyku, měrné teplo a součinitel délkové roztažnosti. Materiál byl uvažován homogenní, izotropní, lineárně pružný.

- **S6 – veličiny popisující procesy a stavy entity**

Procesy a stavy entity jsou popsány pomocí tepelných toků a napětí.

- **S7 – veličiny popisující projevy entity**

Projevy entity jsou popsány pomocí teplot a posuvů v jednotlivých bodech entity.

- **S8 – důsledky projevů**

Důsledkem projevů je změna klíčových vlastností částí entity, jako je přímost, rovnoběžnost, kolmost, rovinnost atd. Tím je ovlivněna výrobní přesnost celého obráběcího stroje.

2.6. Výběr metody řešení, volba softwaru a hardwaru

S ohledem na charakter a vlastnosti systému podstatných veličin je nutné vybrat vhodnou metodu pro vyřešení daného problému. K řešení problému byl zvolen tzv. *nepřímý přístup*, konkrétně výpočtové modelování. S uvážením těchto skutečností přicházela v úvahu pouze numerická metoda. K řešení pomocí experimentální metody nebylo možné přistoupit z důvodu vysoké finanční nákladnosti. Z numerických metod byla vybrána metoda konečných prvků.

Programů používajících metodu konečných prvků je na trhu stále větší množství. Mezi nejpoužívanější MKP software patří ANSYS, který byl také použit pro výpočtové modelování v této práci, konkrétně ANSYS s uživatelským prostředím Workbench 15.0. Pro úpravu modelů geometrie byl použit software Autodesk INVENTOR Professional 2017. Editace textu a tabulek byla provedena v programu Microsoft Word 2016 a Microsoft Excel 2016. V tabulce 2.1 je uveden souhrn použitého softwaru a hardwaru.

Tab. 2.1: Použitý software a hardware.

Použitý software			Použitý hardware		
Program	Operační systém	Architektura	Procesor	Operační paměť	Grafická karta
ANSYS Workbench	Microsoft Windows 10 Pro	64 bit	Intel® Xeon™, 3,4/3,8 GHz, 4 jádra, 8 vláken	DDR3 16GB (2x8GB)	nVidia® GeForce GTX 1060
Autodesk INVENTOR	Microsoft Windows 10 Pro	64 bit	Intel® Core™ i5, 2,4/3 GHz, 2 jádra, 4 vlákna	DDR3 8GB (2x4GB)	Intel® HD Graphics 3000
Microsoft Word, Excel	Microsoft Windows 10 Pro	64 bit	Intel® Core™ i5, 2,4/3 GHz, 2 jádra, 4 vlákna	DDR3 8GB (2x4GB)	Intel® HD Graphics 3000

3. REŠERŠNÍ STUDIE

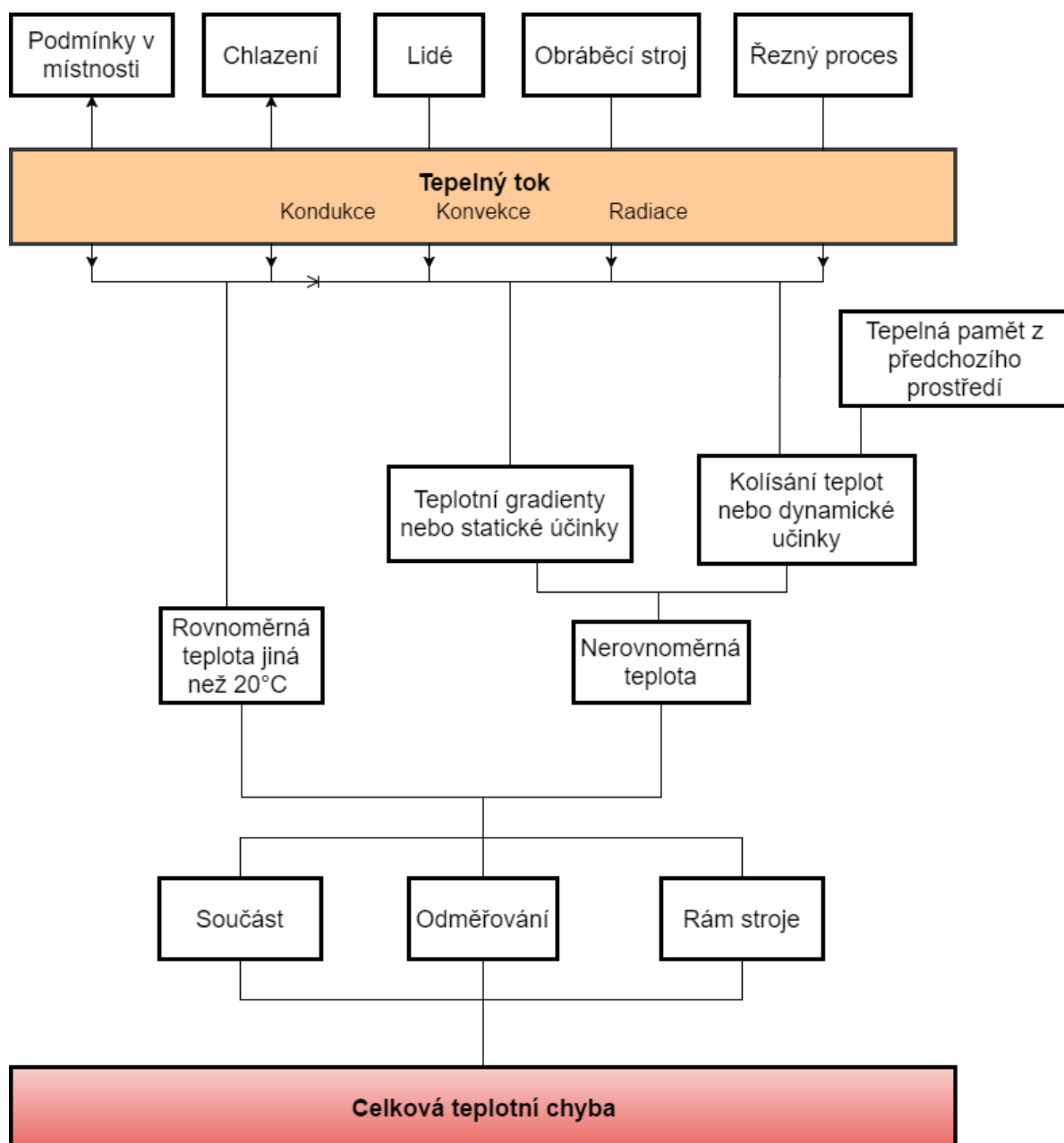
Následující kapitola seznamuje čtenáře se základními teoretickými poznatky z oblasti problematiky tepla a jeho vlivu na obráběcí stroje, dále popisuje základy termomechaniky, kde je větší pozornost věnována přenosu tepla. V dalších oddílech jsou popsány základní principy metody konečných prvků v deformačně-napětových a teplotních analýzách. Na závěr jsou uvedeny možné způsoby redukce teplotních chyb u obráběcích strojů.

3.1. Teplotní problémy u obráběcích strojů

Nároky na přesnost obráběcích strojů se v dnešní době stále zvyšují. Se zvyšujícími se nároky na přesnost se odкрývají i příčiny těchto nepřesností, mezi které patří zejména statické a dynamické chování stroje, geometrická přesnost, řídicí systém, odměřování, výrobní postup a hlavně teplotní chování obráběcího stroje. V posledních letech došlo k výraznému posunu vpřed v oblasti statického a dynamického chování obráběcích strojů, což zapříčinilo, že ještě větší část výrobních nepřesností je způsobena teplotním chováním. Dle [2] může teplotní chyba ovlivnit výrobní přesnost stroje o 40-70 %. Dle ISO 230-3 (2007) se měření teplotních chyb dokonce stalo částí přejímacích testů, kde jsou ve 3 zkouškách měřeny chyby vzniklé teplotním kolísáním prostředí, tepelné deformace způsobené otáčením vřetena a tepelné deformace způsobené pohybem v lineárních osách. Z toho vyplývá, že problematikou vzniku teplotních nepřesností u obráběcích strojů se určitě vyplatí zabývat. [3]

3.1.1. Klasifikace teplotních problémů u obráběcích strojů

K získání uceleného pohledu na problematiku týkající se obráběcích strojů a jejich ovlivnění teplem je vhodné uvést základní pojmy a vztahy mezi nimi (viz. obr. 3.1)



Obr. 3.1: Diagram tepelných účinků na obráběcí stroj. (vlastní překlad [2])

Diagram rozděluje teplotní účinky do dvou hlavních kategorií:

1. Způsobené rovnoměrnou teplotou jinou než 20 °C.
2. Způsobené nerovnoměrnou teplotou.

Dále je zde vidět, že každá měřicí a obráběcí operace se skládá ze tří částí tvořící celkovou teplotní chybu:

1. Součást.
2. Odměřování.
3. Rám stroje.

Geometrickými chybami je myšlena kolmost, přímost, plochost atd.

Z diagramu také můžeme vyčíst 6 faktorů ovlivňujících přenos tepla v soustavě:

1. Podmínky v místnosti.
2. Chlazení.
3. Lidé.
4. Obráběcí stroj.
5. Řezný proces.
6. Tepelná paměť z předcházejícího prostředí.

Důležitá je šipka označující, že pouze podmínky v místnosti a chlazení mohou způsobit rovnoměrné teploty jiné než 20 °C.

3.1.2. Teplotní deformace

Teplotní deformace, je deformace způsobená teplotním zatěžováním tělesa. V [4] je deformace tělesa definována jako změna polohy jeho bodů ke vztažnému souřadnicovému systému.

Například pro prut o počáteční délce L_0 a konečné délce L lze jeho deformace popsat přetvořením ε , pro které platí rovnice 1.1.

$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (3.1)$$

Dle [5] platí pro přetvoření ε^{th} elementárního tělesa v prostoru způsobené změnou teploty rovnice 1.2. (pro materiál s lineárně pružným chováním).

$$\varepsilon^{th} = \Delta T \alpha^{se} \quad (3.2)$$

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (3.3)$$

Kde je:

T aktuální teplota [K], T_{ref} původní teplota [K], α^{se} teplotně závislý sečný vektor koeficientů teplotní roztažnosti [K⁻¹], ε^{th} vektor tepelného přetvoření [-].

$$\alpha^{se} = [\alpha_x^{se} \alpha_y^{se} \alpha_z^{se} 0 \ 0 \ 0]^T \quad (3.4)$$

$$\varepsilon^{th} = [\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \varepsilon_{xy} \ \varepsilon_{yz} \ \varepsilon_{xz}]^T \quad (3.5)$$

Kde je:

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ délkové přetvoření od tepelného namáhání [-], $\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yz}, \varepsilon_{xz}$ úhlové přetvoření (zkos) od tepelného namáhání [-].

Velmi důležitý je pojem v manuálu ANSYSu [5] nazvaný jako teplotně závislý sečný koeficient teplotní roztažnosti (obecně nazývaný součinitel teplotní roztažnosti). Ten určuje, jak se materiál deformuje při změně teploty. Jak již bylo řečeno, je teplotně závislý, tudíž nelze jednoduše určit jeho hodnotu pro daný materiál, ale důležitá je i referenční teplota. Uvažovat ho za konstantu u izotropního materiálu ($\alpha_x^{se} = \alpha_y^{se} = \alpha_z^{se}$) lze pouze při zjednodušených úlohách (malá změna teploty). Například ve výpočetním programu ANSYS Workbench 15.0 je izotropický sečný koeficient teplotní roztažnosti při 22 °C pro běžnou konstrukční ocel $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ a základní hliníkovou slitinu $2,3 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$.

Ukázka teplotní roztažnosti materiálu je na obrázku 3.2, kde jsou mezi kolejnicemi záměrně umístěné dilatační mezery z důvodu změny délky kolejnic zejména v letních měsících.



Obr. 3.2: Dilatační mezery na kolejnicích [6].

3.2. Termomechanika [7], [8]

V této kapitole je věnována pozornost elementární teorii termomechaniky, a to hlavně z důvodu, že správné pochopení jejích principů a zákonů je potřebné pro správné řešení problémů týkajících se vlivu tepla na obráběcí stroje.

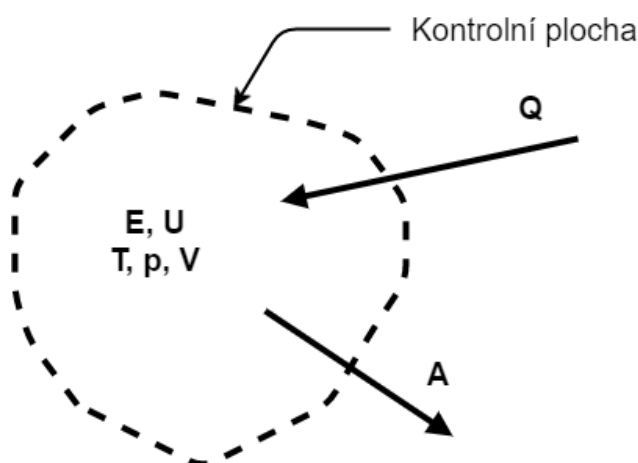
Termomechanika je jedním ze základních vědních oborů zabývajících se získáváním, přeměnami a transportem energie. Nejčastěji se rozděluje na dvě základní části:

- Termodynamika.
- Přenos tepla.

3.2.1. Termodynamika

Termodynamika je věda popisující změny stavu termodynamické soustavy vlivem působení tepla a práce. Předpokládá, že soustava je v tepelné rovnováze s okolím. V úlohách termodynamiky se řeší pouze koncové stavy, mezi nimiž došlo k interakci. Termodynamika se dále nezabývá mechanismem získání tepla ani metodami, jenž slouží ke spočtení tepelného toku ani časovým intervalem, ve kterém došlo k interakci.

Termodynamická soustava (obr. 3.3) je souhrn látek, který je v prostoru účelně omezený vůči okolí tzv. kontrolní plochou.



Obr. 3.3: Schéma termodynamické soustavy.

Teplo Q [J] je jednou z forem přenosu energie mezi soustavou a okolím. Pro předané teplo platí tzv. kalorimetrická rovnice:

$$Q_{12} = m \cdot c \cdot (T_2 - T_1) \quad (3.6)$$

Kde je:

m hmotnost [kg], T_1, T_2 teploty soustavy na začátku a konci předávání tepla [K], c měrná tepelná kapacita [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Práce A [J] je další z forem přenosu energie mezi soustavou a okolím.

3.2.2. Přenos tepla

Přenos tepla, jako součást termomechaniky, odpovídá na otázky, jakým způsobem lze přenést určité množství tepla do nebo ze soustavy na dané ploše v reálném čase. Základním předpokladem pro přenos tepla mezi soustavou a okolím je existence teplotního gradientu nebo rozdílu teplot.

K základním mechanismům přenosu tepla patří:

- **Vedení (*kondukce*)**
- **Proudění (*konvekce*)**
- **Záření (*radiace* nebo sálání)**

V problematice přenosu tepla jsou klíčové dva pojmy:

Celkový tepelný tok \dot{Q} [W] a **měrný tepelný tok** \dot{q} [W·m⁻²]. Měrný tepelný tok je určen tepelným tokem vztaženým na jednotku plochy. Jejich vzájemný vztah je dán rovnicí 3.7.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} \quad (3.7)$$

Kde je:

S plocha, ke které je vztažen tepelný tok [m²].

Přenos tepla vedením (*kondukce*) lze popsat jako přenos energie od více energetických částic k těm méně energetickým. Je-li v tělese teplotní gradient, uskutečňuje se přenos tepla ve směru klesající teploty. Vedení tepla můžeme popsat Fourierovým zákonem: „Měrný tepelný tok \dot{q} [W·m⁻²], tj. celkový tepelný tok \dot{Q} [W] vztažený na jednotku plochy S , přenášený vedením v nějaké látce je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než tento gradient“. Matematicky je Fourierův zákon popsán v rovnici 3.8 (pro těleso v prostoru).

$$\vec{q} = -\lambda \vec{\nabla} T = -\lambda \text{grad} T \quad (3.8)$$

Kde je:

λ [W·m⁻¹·K⁻¹] tepelná vodivost, což je fyzikální vlastnost látky, která je prakticky u všech látek funkcí teploty (u nehomogenních látek závisí i na poloze v tělese). V praktických příkladech lze λ zjednodušeně považovat za konstantu, pohybujeme-li se v malém teplotním intervalu. Jednotlivé tepelné vodivosti látek se mohou velmi lišit, např. pro běžné oceli za běžných teplot se λ pohybuje v řádu desítek, pro hliník a měď v řádech stovek, naopak pro vzduch přibližně v řádu setin.

Vztah pro gradient v kartézské souřadné soustavě je v rovnici 3.9.

$$\vec{\nabla} T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (3.9)$$

Přenos tepla prouděním (*konvekce*) probíhá nejčastěji mezi povrchem tělesa a okolní tekutinou (směr záleží na tom, který z povrchů má vyšší teplotu). Konvekce se skládá ze dvou základních mechanismů:

- **KONdukce**
- **adVEKCE**

Konvekce vzniká superpozicí těchto dvou mechanismů, což se projevuje i v názvu (výše tučně zvýrazněno). Konduktivní přenos tepla spočívá v náhodném pohybu molekul – difúzi. Advekce je chápána jako objemový, makroskopický pohyb tekutiny, tzn. pohyb většího počtu molekul kolektivně (někdy označováno jako agregátní pohyb). Podle geometrické struktury soustavy můžeme hovořit o konvekci:

- při vnějším proudění,
- při vnitřním proudění.

Rozdíl je dán místem styku tekutiny a tělesa. Konvekce při vnějším proudění vzniká například při obtékání lopatek turbín nebo při působení větru na povrch budovy. Konvekce při vnitřním proudění vzniká obecně v soustavách, kdy je tekutina obklopena stěnami, typicky u proudění v trubkách nebo válcích spalovacího motoru. Z hlediska povahy proudění je možno konvektivní přenos tepla rozdělit na 3 skupiny:

- nucená konvekce,
- přirozená konvekce,
- kombinovaná konvekce.

Přenos tepla mezi stěnou a tekutinou je popsán v rovnici 3.10 někdy označované jako Newtonův ochlazovací zákon. Dochází-li k přenosu tepla mezi stěnou a tekutinou, pak je lokální měrný tepelný tok definován následovně:

$$\dot{q} = \alpha(T_s - T_t) \quad (3.10)$$

Kde je:

\dot{q} lokální¹ měrný tepelný tok [$\text{J} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], α lokální součinitel přestupu tepla [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$], T_s teplota stěny [K], T_t teplota tekutiny [K].

¹ Označení lokální (u \dot{q} a α) se používá z důvodu, že režim proudění se mění podél obtékaného povrchu, tím se mění α a následně i \dot{q} .

Přenos tepla zářením (*radiace*) je proces probíhající mezi 2 povrchy, které mají teplotu vyšší než 0 K. Každý takový povrch vyzařuje (emituje) energii na druhý a naopak. Výsledný radiační tok je silně závislý na charakteristice povrchu (např. vyleštěná měď oproti korodující oceli) a na velikosti toků jednotlivých těles. Máme-li 2 tělesa, která vyzařují 50 W (první) a 100 W (druhé), bude výsledný radiační tok 50 W od druhého tělesa k prvnímu. Radiace oproti kondukcí a konvekci dokáže zprostředkovat přenos tepla v systému, ve kterém není zprostředkující látka, typicky ve vakuu. V běžných inženýrských výpočtech se nejčastěji setkáváme se zářením tepelným. Rozsah vlnových délek tohoto záření je zhruba od 0,1 μm do 100 μm . Zářivost ideálně černého tělesa je popsána v Stefan-Boltzmannově zákoně viz rovnice 3.11.

$$E_0 = \sigma T^4 \quad (3.11)$$

Kde je:

E_0 zářivost černého tělesa [$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$], T teplota tělesa [K], σ Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$.

Ideálně černé těleso je zavedeno z důvodu, že emituje největší množství energie při dané teplotě. Reálné těleso emituje menší množství energie označované jako E_λ . Poměr těchto energií se nazývá poměrná zářivost ε_λ . Matematicky poměrnou zářivost vyjadřuje rovnice 3.12.

$$\varepsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_0} \quad (3.12)$$

Kde je:

ε_λ poměrná zářivost², která nabývá hodnot od 0 do 1 [-].

3.2.3. Rovnice vedení tepla

V předchozím oddíle byly uvedeny základní informace o jednotlivých mechanismech přenosu tepla. U prakticky řešených problémů se vyskytují různé kombinace teplotního zatěžování soustav, proměnných v čase, směru, velikosti apod. Proto je nutné vedení tepla popsat vztahem, který všechny zákonitosti respektuje (rovnice 3.13).

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.13)$$

Rovnice 3.13 se nazývá diferenciální rovnice nestacionárního vedení tepla pro elementární objem, kde je:

T teplota [K], λ tepelná vodivost (pro izotropní materiál) [$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], Q měrný tepelný výkon [$\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$], ρ hustota [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$], c měrná tepelná kapacita [$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$], t čas [s].

² Uvažovaná zářivost je monochromatická tzn. uvažuje určitou jednu hodnotu vlnové délky λ . Pozor na rozdíl λ v části přenosu tepla vedením, λ v tomto případě označuje tepelnou vodivost.

Rovnici 3.13 je nutno doplnit o okrajové podmínky, které nejčastěji jsou:

- Předepsaná teplota na povrchu tělesa
- Předepsaný tepelný tok
- Předepsaný přenos tepla konvekci

V případě stacionárního (ustáleného) vedení tepla se rovnice 3.13 redukuje na tvar:

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q = 0 \quad (3.14)$$

Tyto rovnice (3.13 a 3.14) tvoří teoretický základ pro výpočty teplotního pole a teplotní napjatosti popisované v kapitole 3.3.

3.3. Metoda konečných prvků [9]

3.3.1. Úvod

V posledních desetiletích se četnost využití metody konečných prvků neustále zvyšuje, a to hlavně díky její schopnosti řešit složité geometrické soustavy a dále díky rozvoji v oblasti výpočetní techniky. Jak již bylo řečeno v kapitole 2.6, jedná se o numerickou metodu. U této metody většinou převládá variační formulace a deformační přístup. Odlišnost od analytických metod spočívá v diskretizaci hledaných neznámých funkcí na konečný počet neznámých parametrů. Základní úlohou, která je řešena zároveň i v diplomové práci je tzv. *přímá úloha pružnosti*, kdy je u tělesa se známou geometrií, materiálem, zatížením a vazbami určována deformace a napjatost. V obecné statické úloze je napjatost a deformace popsána pomocí 15 neznámých funkcí proměnných x, y, z a to:

- Posuvy: u, v, w .
- Přetvoření: $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$.
- Napětí: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$.

Tyto funkce jsou vzájemně vázány systémem obecných rovnic pružnosti (15 rovnic), které musí být splněny uvnitř řešené oblasti. Jedná se o rovnice rovnováhy, rovnice konstitutivní a geometrické. Dále je nutné splnění předepsaných okrajových podmínek na hranici řešené oblasti. Tyto okrajové podmínky mohou být geometrické či silové. Pokud mluvíme o deformační variantě MKP, není řešeno všech 15 rovnic obecné pružnosti, ale jednotlivé rovnice jsou vzájemně dosazovány a tím dochází k vylučování neznámých. Tím při deformačním přístupu obdržíme rovnice, kde jsou neznámé složky posuvů.

V případě použití deformační varianty MKP a variačního principu je východiskem řešení Lagrangeův variační princip, který je definován následovně: „Mezi všemi funkcemi posuvů, které zachovávají spojitost tělesa a splňují geometrické okrajové podmínky, se realizují ty, které udělají celkové potenciální energii Π stacionární hodnotu.“ Je dokázáno, že uvedená stacionární hodnota existuje, je jednoznačná a představuje minimum Π .

$$\Pi = W - P \quad (3.15)$$

Kde:

W je energie napjatosti tělesa Ω s hranicí Γ_P daná rovnicí 3.16

$$W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}^T \boldsymbol{\varepsilon} dV \quad (3.16)$$

a P je potenciál vnějšího zatížení daný rovnicí 3.17.

$$P = \int_{\Omega} \mathbf{u}^T \mathbf{o} dV + \int_{\Gamma_p} \mathbf{u}^T \mathbf{p} dS \quad (3.17)$$

V rovnicích 3.16 a 3.17 je použito následujících matic:

-matice posuvů	$\mathbf{u}^T = [u, v, w]$
-matice přetvoření	$\boldsymbol{\varepsilon}^T = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}]$
-matice napětí	$\boldsymbol{\sigma}^T = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}]$
-matice objemového zatížení	$\mathbf{o}^T = [o_x, o_y, o_z]$
-matice plošného zatížení	$\mathbf{p}^T = [p_x, p_y, p_z]$

3.3.2. Teplotní napjatost

Další velmi rozšířená skupina úloh jsou úlohy teplotní, které jsou často následovány deformačně-napěťovou analýzou. Nejprve je tedy určeno teplotní pole a poté odpovídající napjatost vzniklá teplotními dilatacemi. Při řešení teplotní napjatosti v MKP systémech je vhodné použít stejné síť jak v teplotní úloze, tak při řešení napjatosti. Většina komerčních MKP softwarů automaticky změní teplotní prvek na strukturní při přechodu z jednoho typu úlohy na druhý. Takto propojená úloha se může nazývat tzv. *slabě sdružená* teplotně-deformační. Teplotní pole zde ovlivňuje deformaci a napjatost, nikoliv naopak. Úlohy, ve kterých se uvažuje ovlivnění v obou směrech, se nazývají tzv. *plně sdružené*.

Výsledná rovnice nestacionárního (neustáleného) přenosu tepla v diskrétním tvaru:

$$\mathbf{C}_T \dot{\mathbf{U}}_T + \mathbf{K}_T \mathbf{U}_T = \mathbf{F}_T \quad (3.18)$$

Kde je:

\mathbf{C}_T	globální matice tepelné kapacity
\mathbf{U}_T	matice neznámých uzlových teplot
\mathbf{K}_T	globální matice tepelné vodivosti
\mathbf{F}_T	matice tepelného zatížení

V případě stacionárního (ustáleného) přenosu tepla se rovnice 3.18 redukuje na tvar 3.19.

$$\mathbf{K}_T \mathbf{U}_T = \mathbf{F}_T \quad (3.19)$$

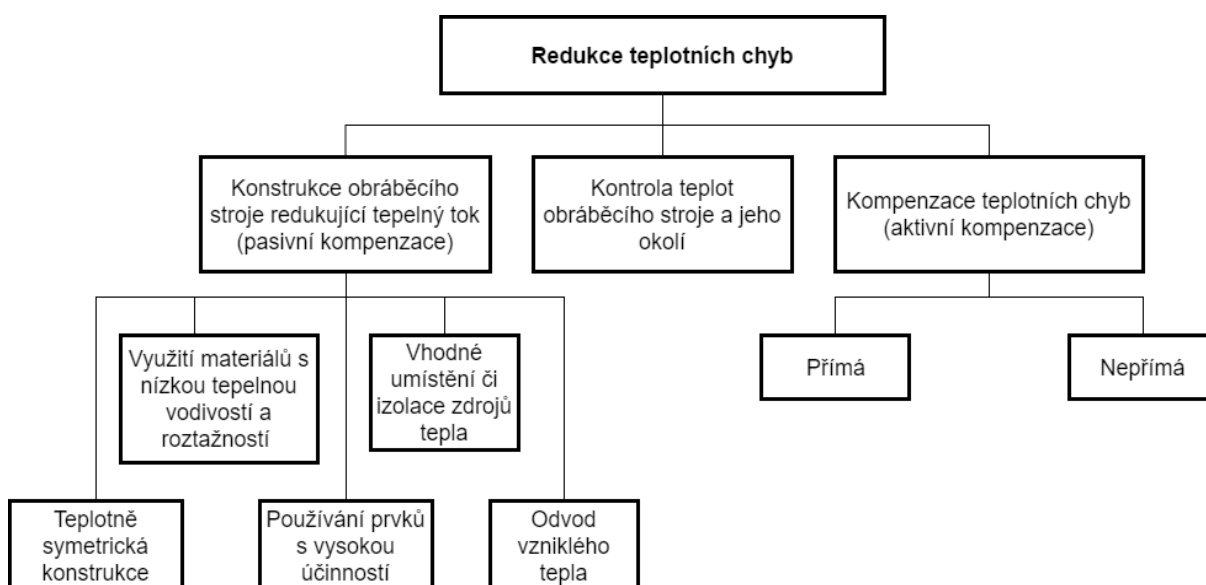
V rovnici 3.19 si můžeme všimnout analogie se statickou deformačně-napěťovou analýzou.

Tab. 3.1: Analogie teplotní a deformačně-napětové analýzy.

Teplotní analýza		Deformačně-napětová analýza	
matice tepelné kapacity	C_T	M	matice hmotnosti
matice tepelné vodivosti	K_T	K	matice tuhosti
matice tepelného zatížení	F_T	F	matice mechanického zatížení
matice neznámých teplot v uzlových bodech	U_T	U	neznámé posuvy (u, v, w) v uzlech
gradient teploty	T'	ϵ	přetvoření
tepelný tok	q	σ	napětí

3.4. Redukce teplotních chyb u obráběcích strojů

V předchozích částech kapitoly byly popsány příčiny a mechanismy vzniku teplotních deformací, dále byly zmíněny základy z teorie teplotních úloh. Následující oddíl se věnuje metodám používaným ke zmírnění většinou nežádoucích účinků teplotního zatěžování obráběcích strojů. Pro začátek je důležité zmínit, že v reálných soustavách se teplotní deformace nikdy nepodaří odstranit úplně, lze je pouze minimalizovat. V článcích [10], [11] a knize [12] autoři rozdělují metody k minimalizaci teplotních chyb do 3 základních skupin a dalších podskupin:



Obr. 3.4: Metody redukce teplotních chyb.

3.4.1. Konstrukce obráběcího stroje redukující tepelný tok (pasivní kompenzace)

Pasivní kompenzace, jenž je také předmětem praktické části diplomové práce, využívá následujících způsobů k minimalizaci teplotních deformací obráběcích strojů:

- **Teplotně symetrická konstrukce stroje.**

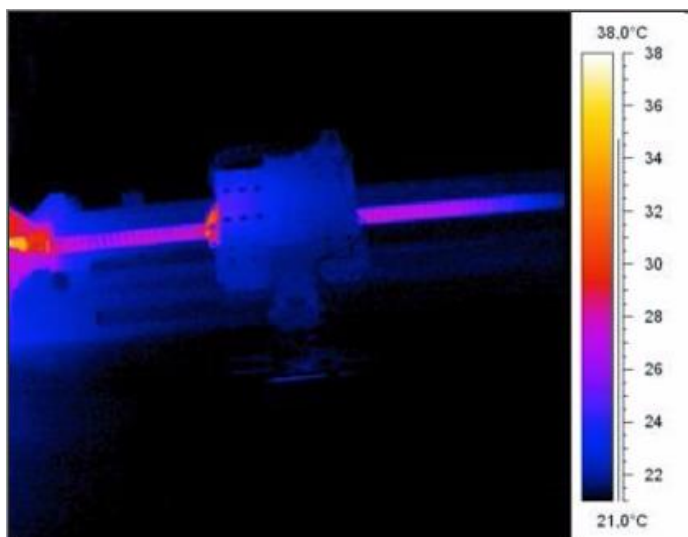
Konstrukce stroje se symetricky umístěnými uzly redukuje velikost teplotních deformací. Případně vznikají dominantně lineární složky deformace, které se snáze kompenzují.

- **Využití materiálů s nízkou tepelnou vodivostí a roztažností**

Konstrukce moderních obráběcích strojů jsou vyrobeny ze speciálních materiálů s nízkou hodnotou koeficientů tepelné vodivosti a roztažnosti (např. přírodní žula) nebo dokonce zápornou hodnotou koeficientu teplotní roztažnosti (plasty vyztužené uhlíkovými vlákny – *CFRP materials*). Tyto speciální materiály se používají například ke kompenzaci deformací hliníkových dílů (deformace hliníku a CFRP materiálu mají opačné směry a navzájem se eliminují). Je však třeba brát v úvahu anizotropní vlastnosti těchto materiálů s uhlíkovými vlákny. Nevýhodou speciálních materiálů je pochopitelně vyšší pořizovací cena.

- **Používání konstrukčních prvků s vysokou účinností**

Konstrukční prvky (pohony, vedení, ložiska) s vysokou účinností výrazně redukují vznik vnitřního tepla a tím i minimalizují teplotní deformace.



Obr. 3.5: Teploty v kuličkovém šroubu při obrábění [13].

- **Vhodné umístění či izolace zdrojů tepla**

Ideální řešení je umístění zdrojů tepla mimo vnitřní prostor stroje, případně umístění do prostoru, kdy gradient teploty vyvolá lineární deformace.

- **Odvod vzniklého tepla** (odvod třísky, žebrování, chlazení zdrojů tepla).

Dle [12] může odcházet až 95 % tepla třískou, proto je velmi důležitý plynulý a rychlý odvod třísek z pracovního prostoru. Dále se využívá žebrování pro zvětšení plochy předávající teplo.

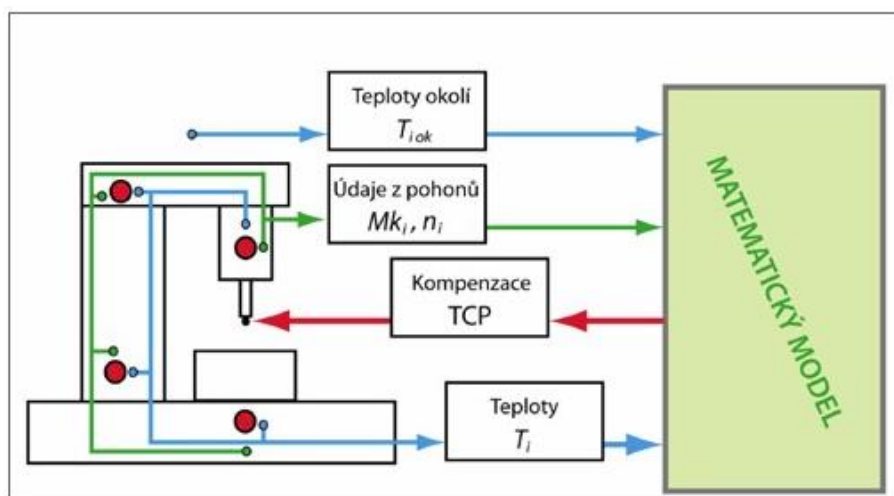
3.4.2. Kontrola teplot obráběcího stroje a jeho okolí

Udržet konstantní teplotu ve výrobní hale je téměř nedosažitelné. Provoz výrobního stroje se těmito podmínkám může přiblížit díky klimatizaci, což je zpravidla velmi nákladné. Dále se využívá odclonění konstrukce stroje od slunečního záření. Určitě je potřeba počítat s postupným (nelineárním) ohřevem stroje na provozní teplotu a následným ochlazením (například při polední pauze, poruše, otevření okna apod.). V neposlední řadě je důležité dbát na chlazení řezných ploch, nástroje a hlavních uzlů (vřeteník, kuličkové šrouby, pohony).

3.4.3. Kompenzace teplotních chyb (aktivní kompenzace) [14]

Obecně se dají kompenzace teplotních deformací rozdělit do dvou podskupin:

- **Přímá** – výsledné posuvy jsou měřeny přerušovaně během pracovního procesu a díky následné korekci je dosaženo zpřesnění v jednotlivých osách. Nevýhodou této metody je již zmíněné odstavování stroje.
- **Nepřímá** – na základě matematického modelu jsou určovány teplotní deformace, které jsou řídicím systémem kompenzovány. Tato metoda je velmi široce používána v praxi, díky své cenové dostupnosti a jednoduchosti. Tvorba matematického modelu je závislá na měření pomocných proměnných (nejčastěji teploty v určitých místech). Mezi nástroje používané pro tvorbu modelu predikujícího teplotně-deformační chování obráběcího stroje patří: vícenásobná lineární regrese (MLR), umělé neuronové sítě (ANN), fuzzy logika a přenosová funkce (TF).

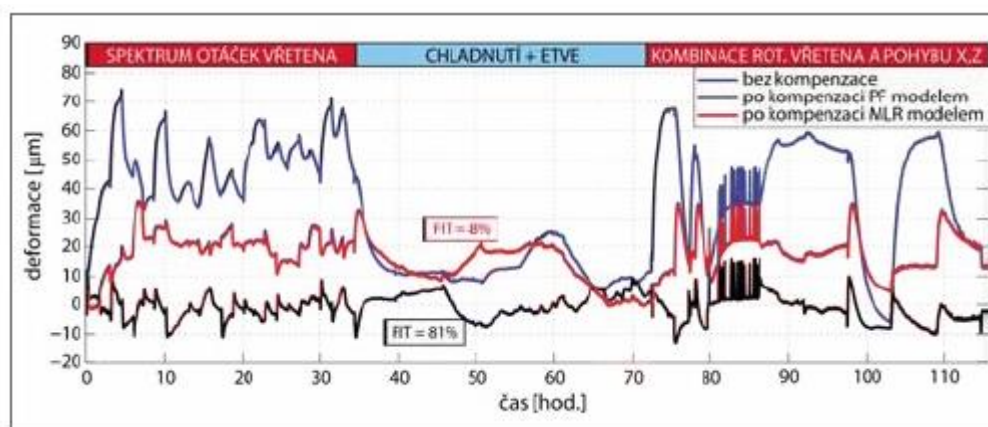


Obr. 3.6: Schéma nepřímé kompenzace [14].

Vícenásobná lineární regrese je založena na tvorbě modelu pomocí kalibračních měření na stroji. Model je popsán většinou polynomicke rovnici s konstantními koeficienty, které jsou ve většině případů určeny z dat jednoho konkrétního měření v jednom pracovním režimu (například za konstantních otáček vřetene, bez pohybu lineárních os). Kompenzační algoritmus je tak vytvořen velmi rychle, avšak jeho spolehlivost a přesnost je nízká, z důvodů zanedbání proměnlivosti otáček, posuvových rychlostí a zrychlení, vedení tepla v konstrukci stroje. Model postrádá informace z míst, kde nejsou umístěny teplotní senzory, čímž se jeho přesnost snižuje. S přidáváním dalších teplotních senzorů roste pořizovací cena a také časová náročnost na zavedení do provozu.

Přenosová funkce je též velmi využívaný nástroj pro predikci teplotních deformací založený na popsání vztahu (přenosové funkce) mezi teplotou v určitém místě a změnou polohy špičky nástroje (TCP) způsobenou teplotní deformací stroje. Touto metodou lze dosáhnout dobrých přesností i v širokém rozsahu pracovních podmínek. V dnešní době jsou vyvíjeny pokročilé metody, které uvažují i teplotní historii. Tím je vytvořen dynamický model, který dosahuje vysoké predikční přesnosti.

Na obrázku 3.7 je porovnání deformací stroje ve směru osy z bez kompenzace (modrá), po kompenzaci založené na modelu přenosových funkcí (černá) a po kompenzaci modelem vytvořeným vícenásobnou lineární regresní analýzou (červená).

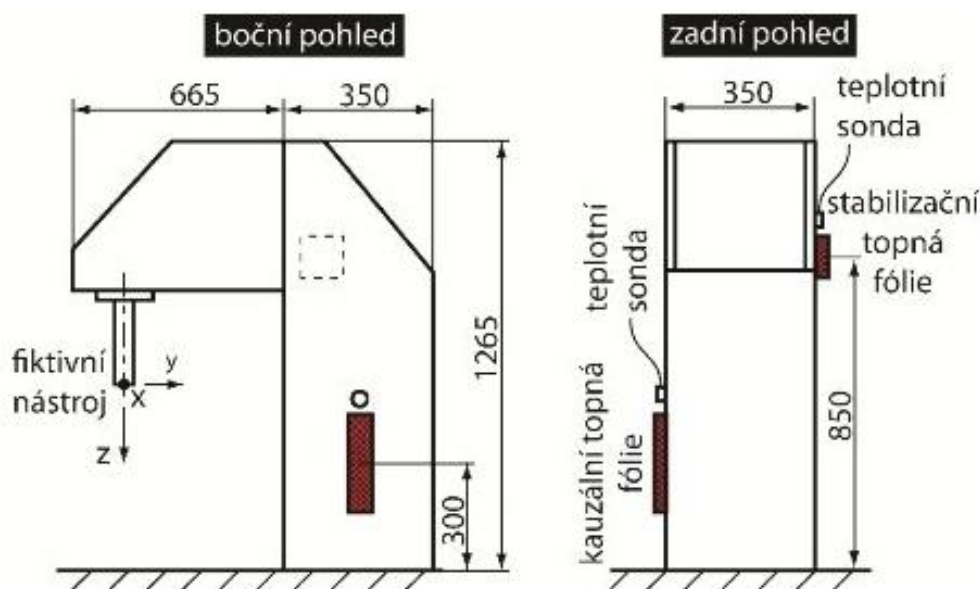


Obr. 3.7: Porovnání kompenzačních metod [14].

Více o modelování pomocí neuronových sítí a fuzzy logiky lze nalézt v [15] a [16]. V praxi však tyto dva způsoby nejsou příliš využívány.

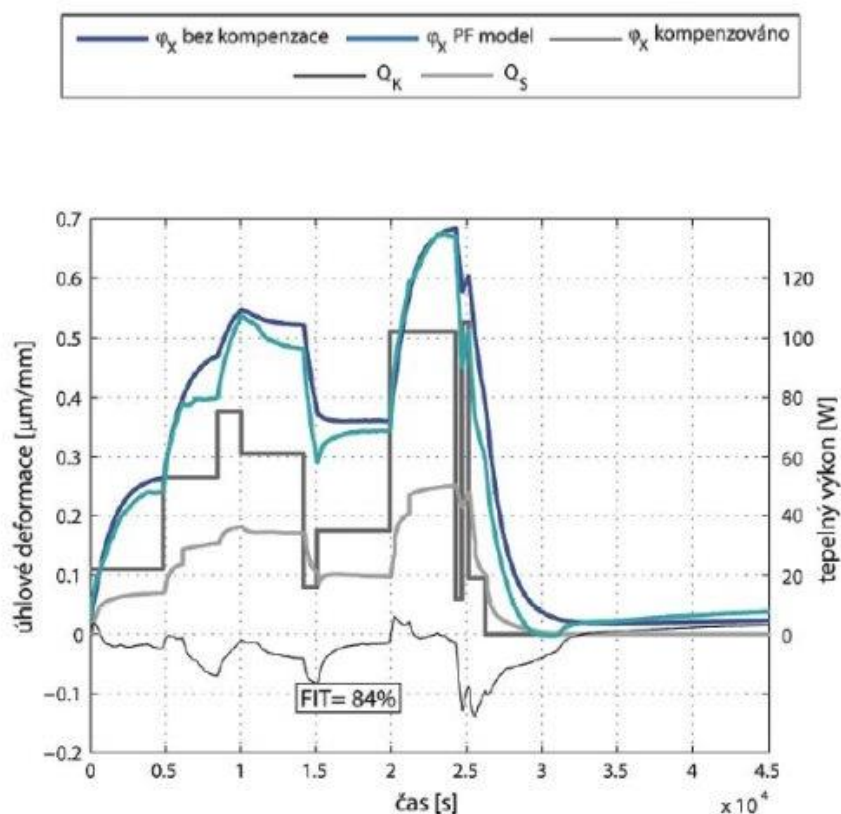
3.5. Teplotní chyby a příklad jejich odstranění [17]

Obecně lze teplotní chybu na špičce nástroje (TCP) rozdělit na lineární a úhlovou složku. Lineární složky chyby se vyskytují v jednotlivých lineárních pohybových osách stroje. Lineární chyba je při použití dobré kompenzační metody snadno redukovatelná, v případě nepřímé metody je modelem určena teplotní chyba a v dané ose je provedena korekce. Naproti tomu úhlové složky teplotní deformace na špičce nástroje jsou problematickým jevem a často se kompenzace neobejde bez dalších opatření, jako jsou například přídavné zdroje a propady tepla v kombinaci s vhodnou kompenzační metodou. Ukázkou správné kompenzace úhlových složek teplotní deformace může být projekt řešení ve spolupráci FS ČVUT a VCSVT. Jedná se o zjednodušenou konstrukci obráběcího stroje s C-rámem (viz obr. 3.8), na které byly nalepeny 2 topné fólie. Kauzální topná fólie představuje reálný zdroj tepla a stabilizační fólie je přídavný akční člen, který má minimalizovat vzniklé úhlové složky deformace. Matematický model byl vytvořen na základě přenosových funkcí.



Obr. 3.8: Schéma kompenzovaného stroje s C-rámem [17].

Na obrázku 3.9 můžeme vidět průběhy úhlových složek deformací bez kompenzace (tmavě modrá), průběh predikovaný modelem PF (světle modrá) a průběh kompenzované úhlové složky deformace (tenká černá), vše v závislosti na čase. Dále je v grafu vynesena průběh tepelného výkonu kauzální fólie (tmavě šedá) a stabilizační fólie (světle šedá), též v závislosti na čase.



Obr. 3.9: Průběhy úhlových deformací a topných výkonů [17].

4. PRAKTICKÁ ÚLOHA

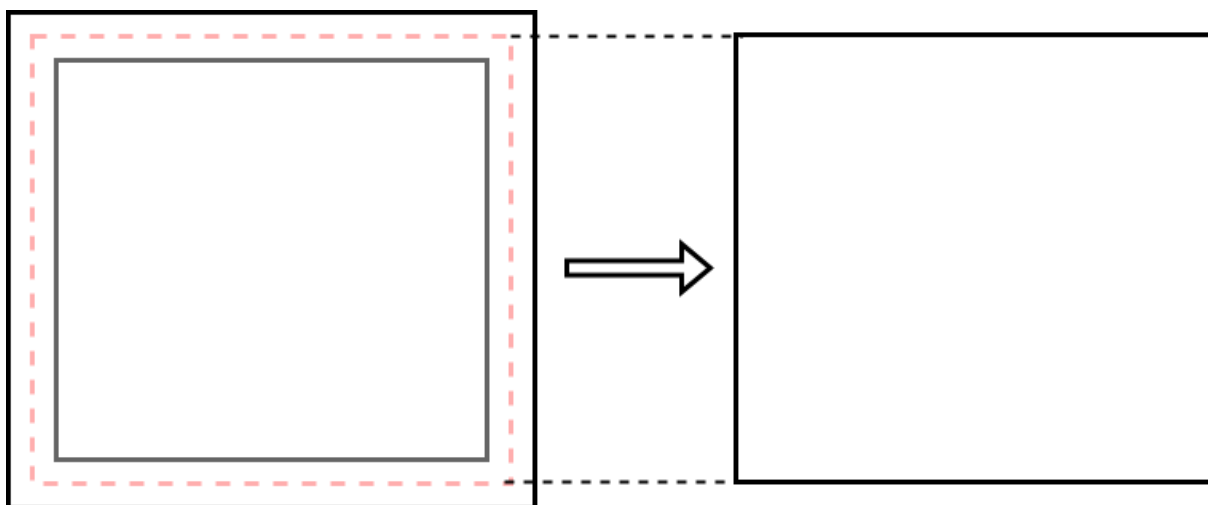
4.1. Tvorba výpočtového modelu Var_1

4.1.1. Model geometrie

S ohledem na daný problém, zvolenou metodu pro řešení a software bylo nutné vytvořit výpočtový model. Společnost Intemac Solutions s.r.o. poskytla podklady potřebné pro tvorbu modelu geometrie.

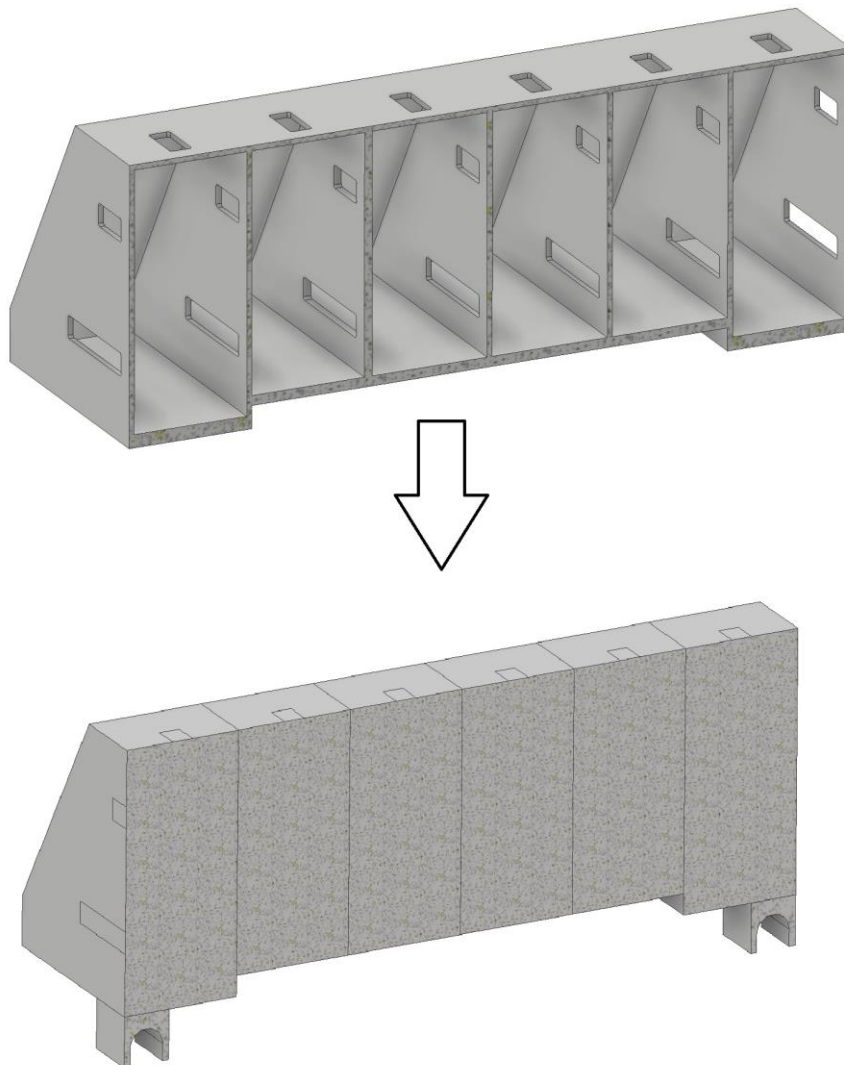
V první části byl obdržení model geometrie otevřen v programu Autodesk Inventor a na základě získaných rozměrů byl vytvořen nový zjednodušený a upravený model. Změna spočívala v provedení následujících kroků:

1. Přepočet rozměrů vzhledem k tloušťce stěn a celkovým rozměrům příčnicku (tento krok byl opodstatněn následným generováním střednicových ploch z povrchů nového modelu).
2. Odstranění malých geometrických detailů (vruby, zaoblení, atd.), které by komplikovaly tvorbu sítě.
3. Rozdělení vybraných povrchů pomocí příkazu *split*. Tento krok byl proveden z důvodu následné generace mapované sítě.
4. Přidání kolejnic lineárního vedení a boxů pro uchycení matice kuličkového šroubu.



Obr. 4.1: Princip tvorby nového modelu geometrie.

Tímto postupem byl vytvořen nový objemový model, který byl exportován do formátu .STEP a následně načten do systému ANSYS Workbench, ve kterém probíhaly simulace a následná optimalizace.



Obr. 4.2: Původní objemový model (nahore) a nový objemový model (dole).

V rámci tvorby modelu Var_1 určenému pro nestacionární teplotně-deformační analýzu v prostředí ANSYS Workbench byly využity následující moduly:

- *DesignModeler*.
- *Mechanical*.

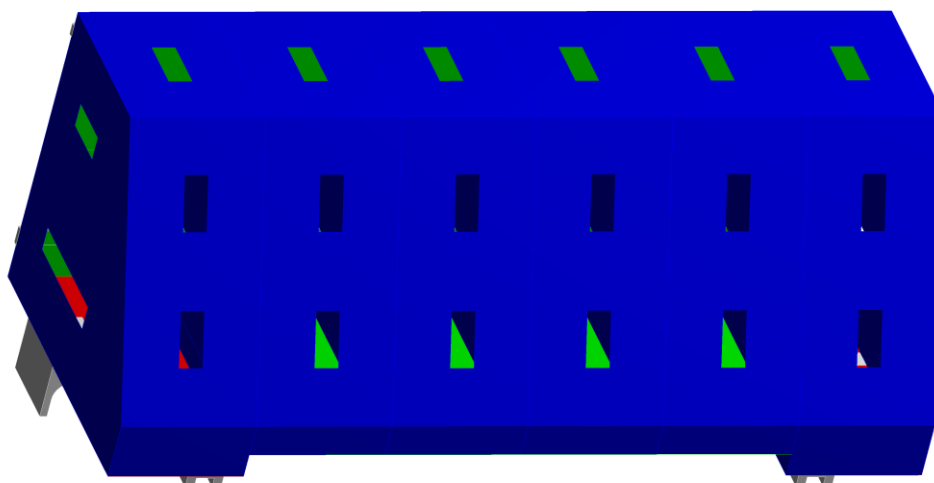
Modul *Design Modeler* byl použit k následujícím operacím:

1. Import nového modelu geometrie z programu Autodesk INVENTOR.
2. Generování střednicových ploch na objemovém modelu pomocí příkazu *surfaces from faces*.
3. Definice tloušťek *surface* povrchů.
4. Další dělení povrchů příkazem *Face Split*.
5. Potlačení 6 objemových částí, na kterých byly tvořeny střednicové plochy.
6. Vytvoření nové součásti (*pricnik*) skládající se ze střednicových ploch.

Tímto byl vytvořen model geometrie skládající se z 10 objemových součástí a 14 střednicových ploch (*surfaces*).

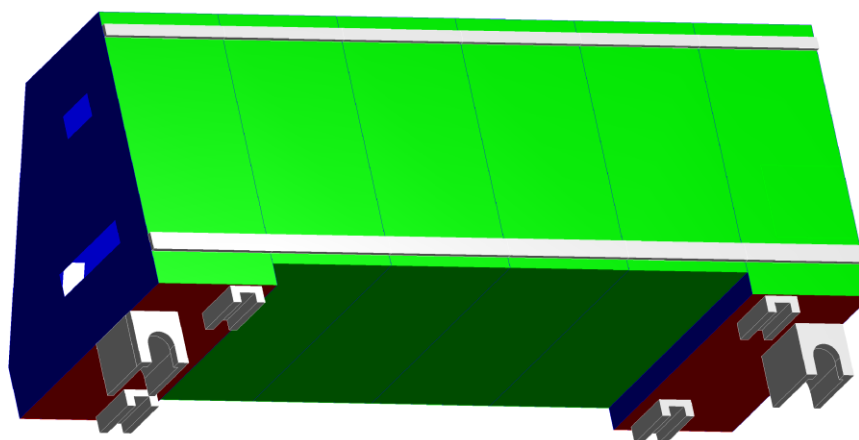
Příčník - pohled zezadu

40,
30,
16,



Příčník - pohled zepředu

40,
30,
16,



Obr. 4.3: Pohled na příčník s barevným vyznačením tloušťky stěn v mm.

4.1.2. Model materiálů

Příčník obráběcího centra je vyroben z litiny dle ČSN 42 2305. Uvedené hodnoty jsou převzaty z normy a platné pro teplotu 20 °C (E , ρ , λ , G) nebo pro interval teplot 20-100 °C (α , c).

• Modul pružnosti v tahu	$E = 169\,000\text{ MPa}$
• Hustota	$\rho = 7050\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$
• Tepelná vodivost	$\lambda = 32,2\text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
• Součinitel délkové roztažnosti	$\alpha = 1,28\cdot 10^{-5}\text{ K}^{-1}$
• Měrná tepelná kapacita	$c = 473\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
• Modul pružnosti ve smyku	$G = 64\,700\text{ MPa}$

Výše uvedené hodnoty byly vloženy do prostředí ANSYS Workbench v kartě *Engineering data* a uloženy jako materiál *Litina*. Materiál byl uvažován homogenní, izotropní, lineárně pružný.

4.1.3. Model vazeb

Uložení příčníku ke stojanům je realizováno pomocí následujících součástí:

- Sestava kuličkového šroubu a matice.
- Lineární vedení.

Pro teplotně-deformační chování příčníku jsou podstatné tuhosti těchto součástí, proto je nutné zjistit velikost a orientaci tuhostí.

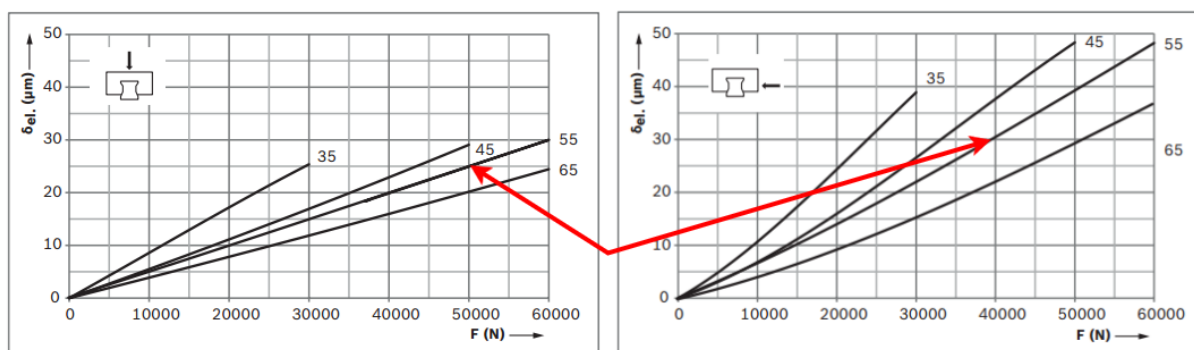
Lineární vedení

Lineární vedení, kterým je vázán příčník, omezuje jeho pohyb ve dvou osách s určitou tuhostí. Typ a značka použitých lineárních vedení na obráběcím stroji jsou ovlivněny požadavky zákazníka, což způsobuje mírné odlišnosti ve vlastnostech. Pro výpočtový model bylo zvoleno lineární vedení firmy BOSCH-Rexroth, konkrétně válečkové vedení FNS – 1851 – 55 s předpětím 16 800 N a standartní přírubou pro 6 šroubů.



Obr. 4.4: Lineární vedení FNS-1851 [18].

Pro výpočtový model je třeba zjistit tuhost této součásti a vhodně ji zavést do analýzy. V produktovém katalogu [18] jsou k dispozici průběhy deformací v závislosti na silovém zatížení ve svislém a podélném směru (obr.4.5).



Obr. 4.5: Tuhostní charakteristiky lineárního vedení [18].

Z grafu je patrné, že se jedná o nelineární závislost, nelineárnost je však velmi slabá a tuhost bude modelována jako lineární závislost, což je první předpoklad. Druhý bere v úvahu pouze tlakové zatížení ve svislém směru. Pro výpočet tuhosti byly zvoleny dva body a z nich vypočtena tuhost dle následujícího vztahu:

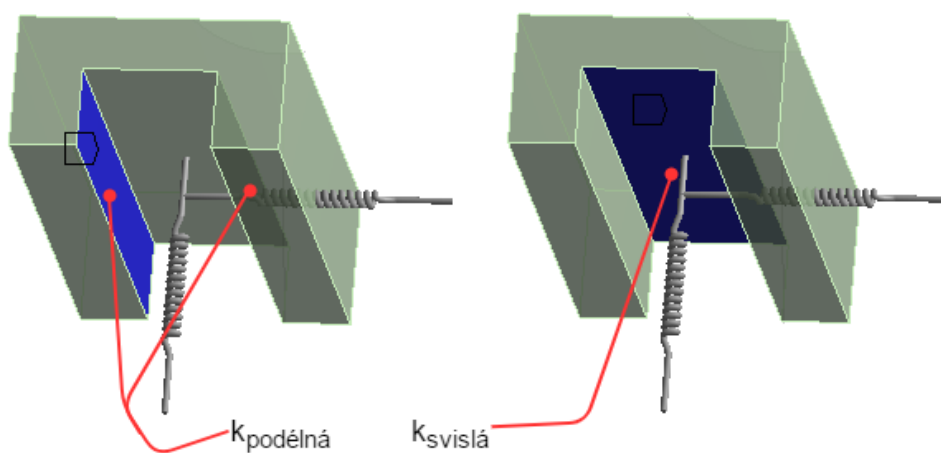
$$k = \frac{F}{\delta} \quad (4.1)$$

Po dosazení dostáváme svislou a podélnou tuhost:

$$k_{\text{svislá}} = \frac{50000}{25} = 2000 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} = 2\,000\,000 \text{ N/mm} \quad (4.2)$$

$$k_{\text{podélná}} = \frac{40000}{30} \approx 1333 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} = 1\,333\,000 \text{ N/mm} \quad (4.3)$$

V dalším kroku je třeba vypočtenou tuhost implementovat do výpočtového modelu. Tuhost lineárního vedení je simulována pomocí spojovacího prvku *spring*. Tomuto prvku bylo přiřazeno lineárně pružné chování a předepsány vypočtené tuhosti. Dále byl zvolen typ *BODY to GROUND*, což znamená, že jeden konec prvku je připojen ke zvolené součásti/ploše/hraně/bodu a druhý nehybně připevněn v předepsaném bodě. Konce byly umístěny dle obrázku 4.6 tak, aby *spring* prvek simuloval tuhost ve vypočtených směrech. Vztažným plochám bylo předepsáno tuhé chování.



Obr. 4.6: Vztažné plochy (modře) pro spring prvky.

Sestava kuličkového šroubu a matice

Posuv v ose y je realizován pomocí sestavy kuličkového šroubu a matice. Kuličkový šroub je jednostranně axiálně uložen. Pro výpočtový model je opět potřebné zjistit celkovou axiální tuhost, k přesnému výpočtu axiální tuhosti soustavy KŠM (kuličkový šroub a matice) je stanovena norma ISO 3408. Pro návrh KŠM, či výpočet trvanlivosti, tuhosti, únosnosti apod. dle ISO 3408 lze použít excelovský program vytvořený v rámci diplomové práce [19]. V katalozích výrobců (KSK, THK, HIWIN) však nejsou uváděny potřebné hodnoty jako síla předeprnutí nebo počet nezatížených kuliček. Dále by bylo třeba experimentálně určit tuhost uložení matice a radiálně axiálního ložiska. Proto byl proveden zjednodušený výpočet s následujícími hodnotami:

- Tuhost matice (KSK APR K63x20) $k_M = 1540 \text{ N}/\mu\text{m}$ [20]
- Tuhost šroubu $k_S = 1120 \text{ N}/\mu\text{m}$
- Tuhost axiálního ložiska (LKSF65155) $k_L = 4800 \text{ N}/\mu\text{m}$ [20]

Tuhost šroubu byla spočtena dle vztahu (4.4) z normy ISO 3408 pro tuhost samotného jednostranně axiálně uloženého kuličkového šroubu (plného).

$$k_S = \frac{\pi \cdot d_c^2 \cdot E}{4 \cdot L \cdot 10^3} \quad (4.4)$$

$$k_S = \frac{\pi \cdot 58,28^2 \cdot 200\,000}{4 \cdot 500 \cdot 10^3} \cong 1067 \text{ N}/\mu\text{m} \quad (4.5)$$

Kde je:

d_c průměr dosedu na šroubu [mm], E modul pružnosti v tahu šroubu (uvažována ocel jakosti ČSN 14 260) [MPa], L uvažovaná vzdálenost mezi axiálním ložiskem a maticí [mm].

Průměr dosedu na šroubu d_c je dán vztahem 4.6.

$$d_c = d_{pw} - d_w \cdot \cos(\alpha) \quad (4.6)$$

$$d_c = 65,58 - 10,319 \cdot \cos(45^\circ) = 58,28 \text{ mm} \quad (4.7)$$

Kde je:

d_{pw} roztečný průměr hřídele (pro K63×20) [mm], d_w průměr kuličky (převzat z [20]) [mm], α úhel dosedu kuličky (standardně 45°) [$^\circ$].

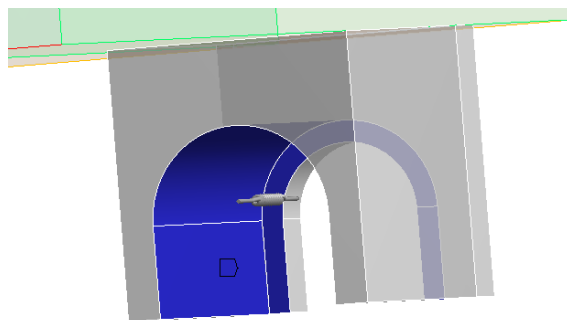
Výsledná tuhost pak bude:

$$\frac{1}{k_C} = \frac{1}{k_S} + \frac{1}{k_M} + \frac{1}{k_L} \quad (4.8)$$

$$\frac{1}{k_C} = \frac{1}{1067} + \frac{1}{1540} + \frac{1}{4800} \quad (4.9)$$

$$k_C = 557,1 \frac{\text{N}}{\mu\text{m}} = 557\,100 \text{ N}/\text{mm} \quad (4.10)$$

Výsledná tuhost je do ANSYSu opět zadána pomocí vazby *spring*, které byla předepsána vypočtená tuhost. V nastavení vazby byl taktéž jako u lineárního vedení vybrán typ *body to ground* (obr. 4.7).



Obr. 4.7: Vztažné plochy (modře) pro spring prvek.

4.1.4. Kontakty

Jelikož se soustava skládá z více součástí, mezi jejichž povrchy dochází ke kontaktu, je třeba tuto vzájemnou interakci vhodně modelovat. V prostředí ANSYS Workbench je možné využít automatickou generaci kontaktů, uživatel si pak ale nemůže být jist, zda definoval všechny potřebné kontakty nebo naopak jestli nedošlo k přidání neexistujícího kontaktu či nevhodného typu kontaktu. Z toho důvodu byly kontakty definovány ručně. Vzhledem k tomu, že všechny kontaktní povrchy byly pevně spojeny, byl zvolen kontakt typu *BONDED*. Jedná se o kontakt modelující pevné spojení kontaktních elementů typu *surface to surface*. Dále bylo třeba ke kontaktu zvolit formulaci, jakou budou kontakty řešeny. ANSYS Workbench nabízí 4 formulace pro řešení kontaktů:

- *Pure penalty.*
- *Augmented Lagrange.*
- *Normal Lagrange.*
- *MPC.*

Po zvážení byla vybrána formulace *MPC*, která je vhodná pro kontakty typu *BONDED*. Mezi nejdůležitější vlastnosti formulace *MPC* patří:

- Dobrá konvergence.
- Není požadována normálová tuhost.
- Nedochází k penetraci ploch.
- Možnost využití iterativního i přímého řešiče.
- Použití pouze u *BONDED* a *NO SEPARATION* kontaktů.

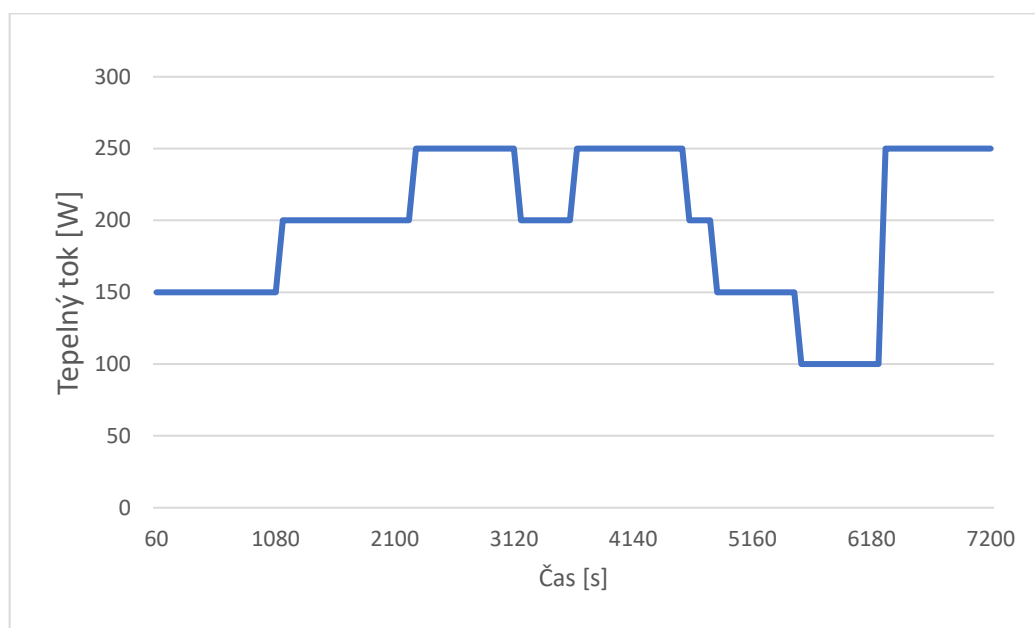
Celkem bylo tedy vytvořeno 10 kontaktních dvojic typu *BONDED* s *MPC* formulací:

- 4 tělesa vozíků lineárního vedení,
- 2 montážní lišty,
- 4 tělesa sloužící k uložení matice kuličkového šroubu (2 boxy, 2 příruby).

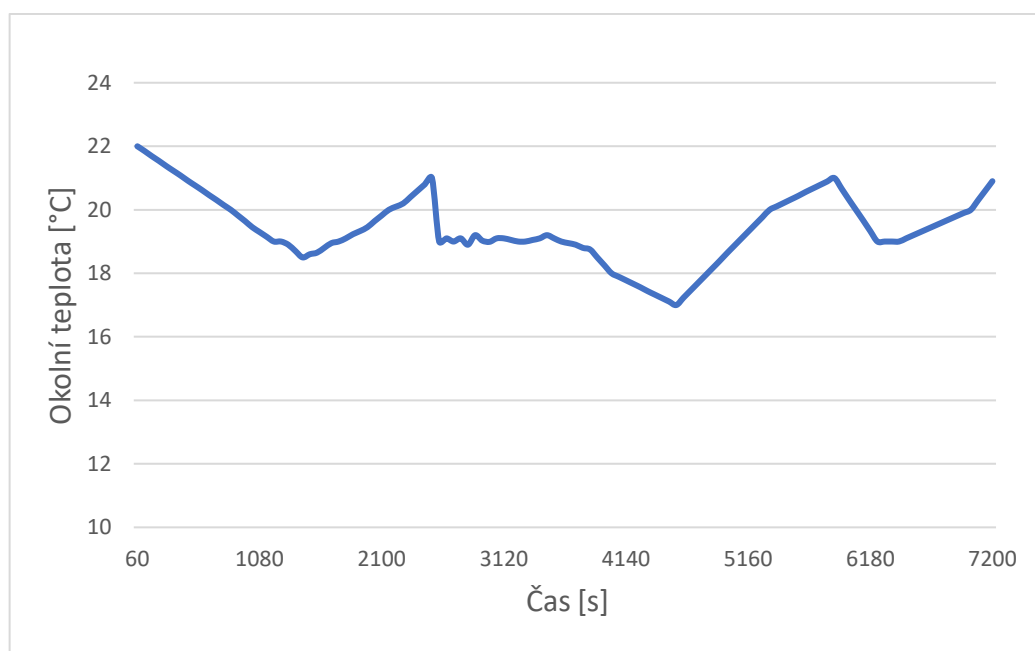
Všechna výše zmíněná tělesa byla v kontaktní dvojici s některým ze skořepinových povrchů příčníku.

4.1.5. Model zatížení

Model zatěžujících účinků byl vytvořen tak, aby co nejlépe simuloval reálné teplotní zatížení příčnicku během provozu a zároveň tak, aby bylo možné použít stejné zatěžování v laboratorních podmínkách a ověřit model experimentálně. Od zaměstnanců Intemac Solutions s.r.o. byl získán průběh tepelných toků (obr. 4.8) a teploty okolního vzduchu (obr. 4.9) v čase, který byl použit pro testování teplotního chování součástí. Tepelným tokem byla zatížena plocha umístění motoru pohánějící kuličkový šroub.

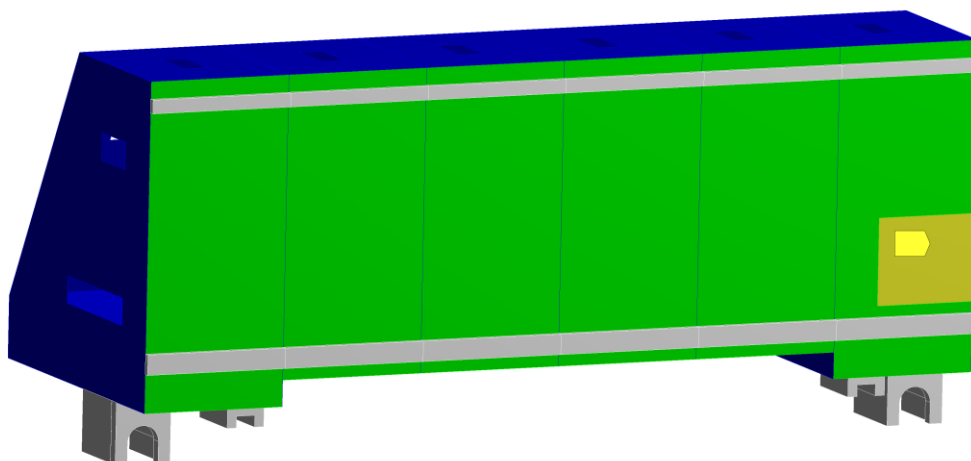


Obr. 4.8: Průběh tepelného toku v čase.



Obr. 4.9: Průběh teploty okolního vzduchu.

Jak je z grafů patrné, jedná se o dvouhodinové zatěžování. Zadáno bylo 120 hodnot s konstantním časovým krokem 60 sekund. Na dalším obrázku 4.10 je žlutě vyznačená plocha, která byla zatížena tepelným tokem. Konvektivní zatížení bylo předepsáno na všechny povrchy s výjimkou kontaktních ploch (viz kapitola 4.1.4.). Koeficient přestupu tepla konvekcí α uvažován konstantní $5 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$, tato hodnota v ANSYSu odpovídá vzduchu v klidovém stavu.



Obr. 4.10: Plocha (žlutá) zatížená tepelným tokem.

4.1.6. Síť konečných prvků

Pro generaci sítě konečných prvků bylo použito následujících příkazů: *edge sizing*, *mapped face mesh* a *Multi-zone method*.

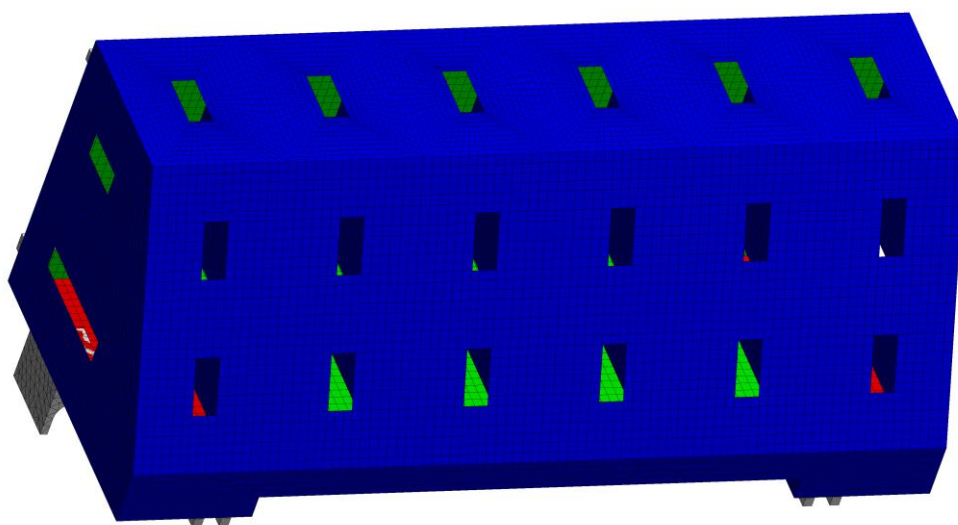
Použité prvky

Teplotní analýza – stupeň volnosti v uzlu je teplota.

- Solid90 – objemový, kvadratický šestistěn obsahující 20 uzlů,
- solid87 – objemový, kvadratický čtyřstěn obsahující 10 uzlů,
- shell131 – skořepinový, lineární čtyřúhelník se 4 uzly,
- conta174 – kontaktní 4 uzlový prvek,
- targe170 – kontaktní 4 uzlový prvek,
- surf152 – skořepinový, kvadratický čtyřúhelník s 10 uzly.

Strukturální analýza – stupně volnosti se z teplot mění na posuvy ve směru os x , y , z , případně rotace kolem os x , y , z . Prvky z teplotní úlohy jsou nahrazeny prvky vhodnými pro strukturální úlohu se stejným počtem uzlů.

- Solid186 – obdoba solidu90 se 3 stupni volnosti na uzel (posuvy),
- solid187 – obdoba solidu87 se 3 stupni volnosti na uzel (posuvy),
- shell181 – obdoba shellu131 se 6 stupni volnosti na uzel (posuvy + rotace),
- conta174 – změna stupňů volnosti z teplot na posuvy, případně rotace,
- targe170 – změna stupňů volnosti z teplot na posuvy, případně rotace,
- combin14 – nehmotný prvek obsahující 2 uzly, kterému lze přiřadit tlumení či tuhost. Jeho ohybová tuhost je nulová.

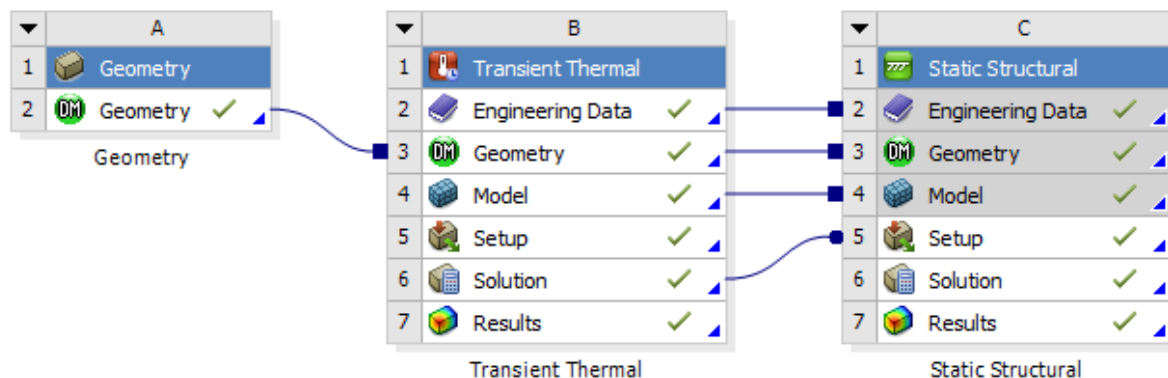


Obr. 4.11: Ukázka sítě konečných prvků modelu Var_1.

4.2. Nastavení analýz

Předchozí kapitola popisovala tvorbu výpočtového modelu Var_1, ten byl použit pro 2 typy analýz:

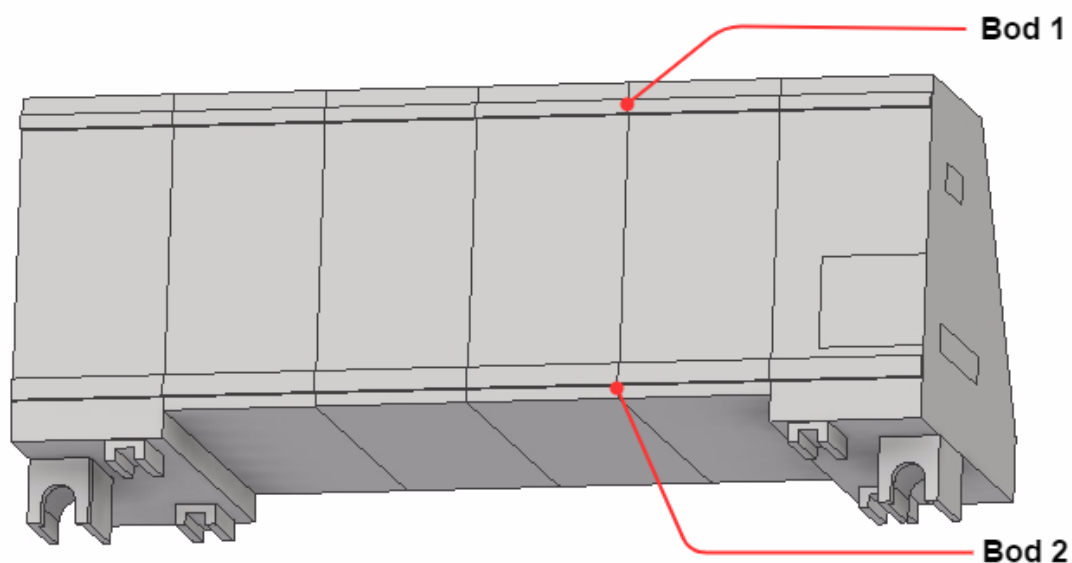
- Přechodová (neustálená) teplotní analýza.
- Statická strukturální analýza.



Obr. 4.12: Schéma analýz v programu ANSYS Workbench.

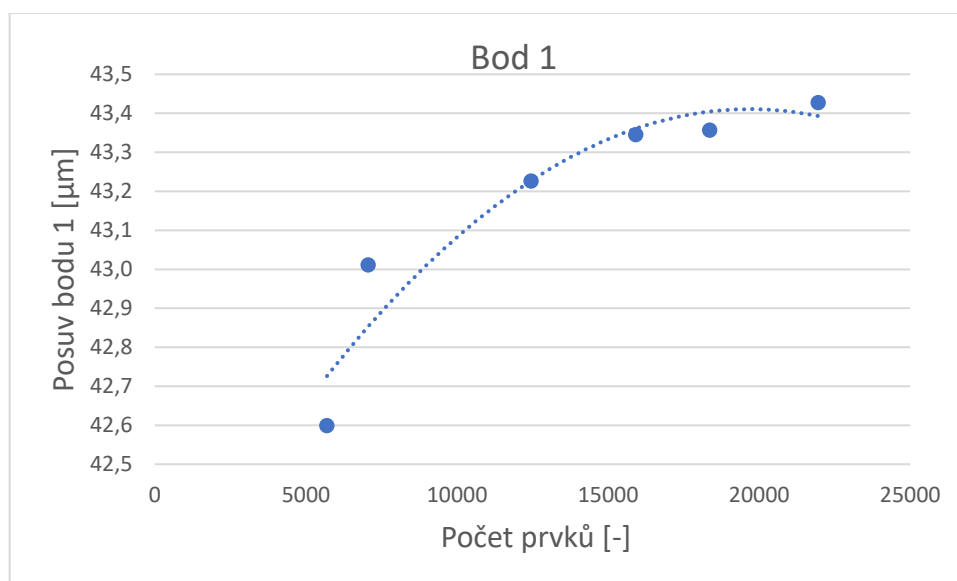
V první řadě bylo třeba provést přechodovou teplotní analýzu pro zjištění teplotního pole během 2 hodinové simulace. Její nastavení bylo následující: jednotná počáteční teplota = 22 °C, počet zatěžovacích kroků (*load steps*) = 120, automatické řízení časového kroku – řešič si sám upravuje délku časového kroku za účelem snížení výpočetního času. Dále byla předepsána počáteční délka kroku na 0,5 s, minimální délka kroku 0,05 s a maximální délka kroku 5 s. Analýza byla provedena i s minimální délkou kroku 0,005. Výsledky (minima, maxima, průběhy) byly stejné a z dělení kroků bylo zřejmé, že o řád kratší minimální délka časového kroku nebyla řešičem využita.

Určené teplotní pole pak vstupovalo jako zatěžující účinek do statické strukturální analýzy, v níž byly vyhodnocovány posuvy ve 24 konstantních intervalech po 300 sekundách. Pro kompenzaci deformací provedenou v kapitole 4.3. bylo třeba určit parametry, které budou charakterizovat chování příčnicku během teplotního zatěžování. Vyhodnocování posuvů ve všech místech pro každý vypočtený čas by bylo časově velmi náročné, proto byly zvoleny 2 referenční body, které leží na upínacích lištách. Tyto body byly zvoleny, protože vliv příčnicku na obráběcí přesnost je určen zejména deformací lišt, které slouží k upnutí saní.

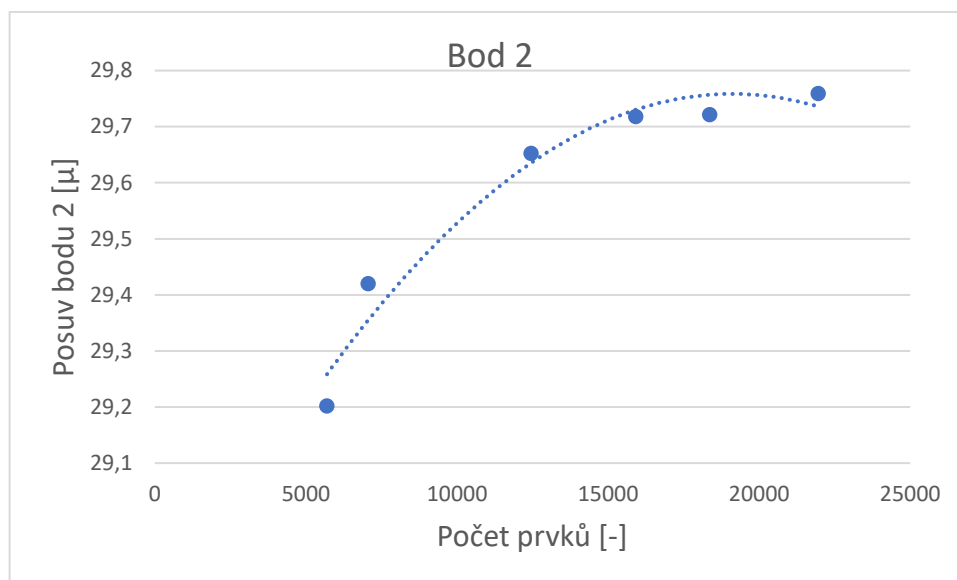


Obr. 4.13: Referenční body.

V dalším kroku bylo provedeno několik zkušebních výpočtů na sítích s různým počtem prvků a byl zjišťován vliv mezi počtem prvků a výslednými deformacemi referenčních bodů na konci zatěžování (čas 7200 s). Motivace těchto zkušebních výpočtů byla v nalezení síť konečných prvků, která by správně popisovala deformaci zkoumaných bodů a zároveň nebyla příliš hustá, což by prodlužovalo výpočet. Jako vhodná byla vybrána síť s 18 018 prvky, kdy změna posuvu vybraných bodů oproti síti s 15 925 prvky byla menší než 1 % v obou případech.



Obr. 4.14: Závislost posuvu bodu 1 na počtu prvků.



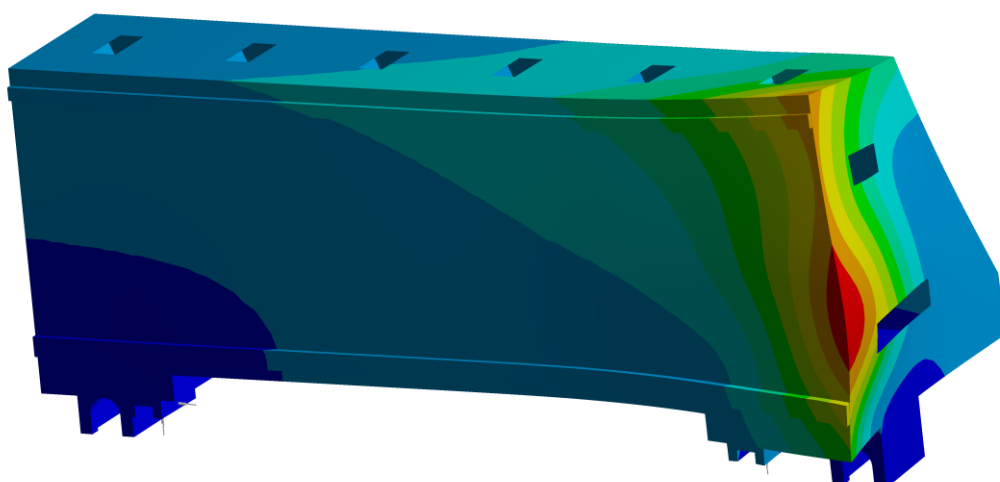
Obr. 4.15: Závislost posuvu bodu 2 na počtu prvků.

4.3. Výsledky zatěžování modelu Var_1

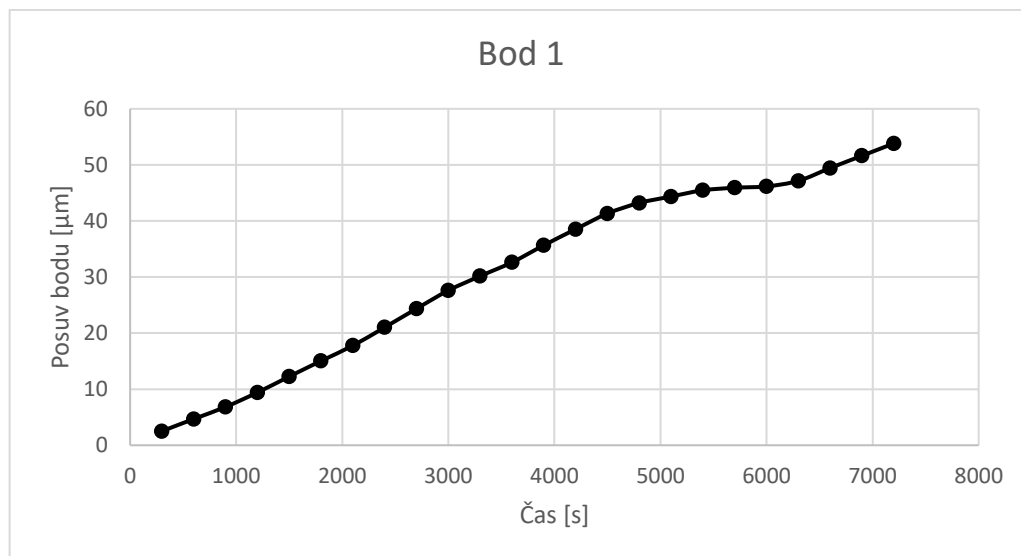
Na modelu Var_1, jehož tvorba byla popsána v předchozí kapitole 4.1. byly provedeny analýzy popsané v kapitole 4.2. a byly získány výsledky, ze kterých lze vyčíst, že nejvíce zdeformovaná část je boční hrana, místo umístění pohonu. Posuvy referenčních bodů během zatěžování rostou a jsou v řádu desítek μm . Jako příklad je uveden deformovaný tvar v čase 7200 sekund a průběh posuvů referenčních bodů. Výsledky posuvů jiných bodů na lištách jsou uvedeny v kapitole 4.6.

C: Static Structural
Figure
Type: Total Deformation
Unit: mm
Time: 7200

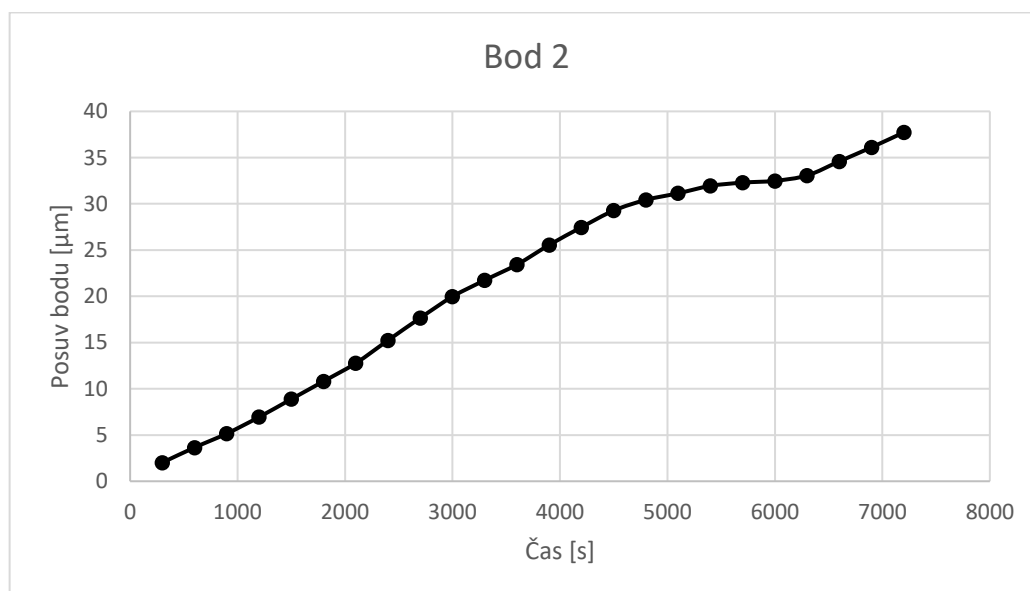
0,203 Max
0,18
0,158
0,136
0,113
0,0909
0,0685
0,0462
0,0238
0,0014 Min



Obr. 4.16: Deformovaný tvar modelu Var_1.



Obr. 4.17: Průběh posuvu referenčního bodu 1.

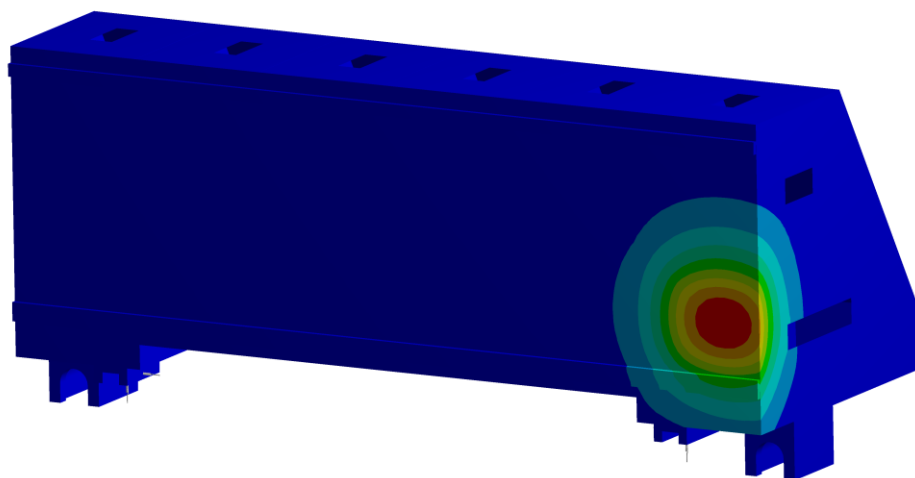


Obr. 4.18: Posuv referenčního bodu 2.

Z obrázku 4.16, 4.17, 4.18 je zřejmé, že na horní upínací liště dochází k větším posuvům oproti dolní liště, což je způsobeno vyšší vzdáleností od uložení příčnicku (lineární vedení, KŠM). Dále lze pozorovat velmi malé hodnoty posuvů dolní lišty v oblasti levého (podle obr. 4.16) uložení, což lze přikládat malým změnám teploty v této oblasti a také malé vzdálenosti od tuhého uložení. Spíše pro orientaci, je níže uveden obrázek s vykreslením teplot v čase 3600 sekund a 7200 sekund. Vývoj teploty je dle očekávání, kdy roste velikost teplotně ovlivněné oblasti i maximální teplota. Podrobnější analýza spolu s porovnáním jiných variant je v kapitole 4.6.

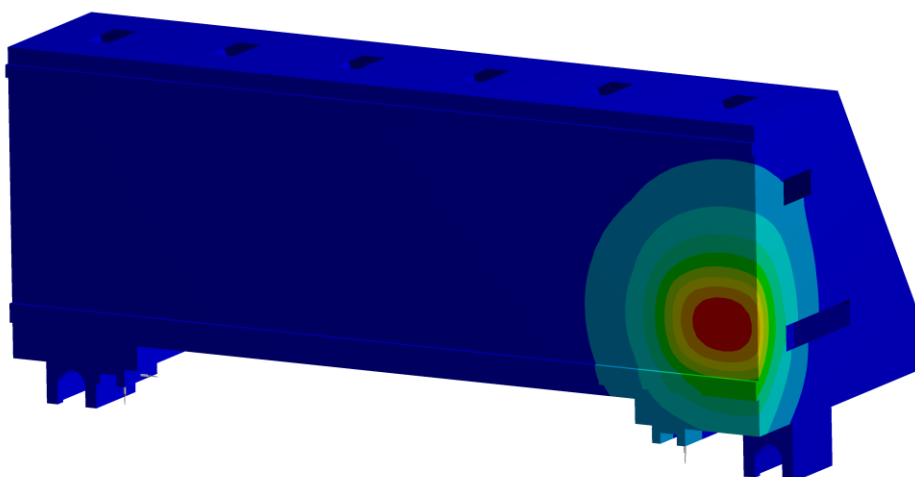
Type: Temperature
Unit: °C
Time: 3600

64 Max
59
54
50
45
40
36
31
26
21 Min



Type: Temperature
Unit: °C
Time: 7200

72 Max
66
61
55
49
44
38
32
26
21 Min



Obr. 4.19: Výsledky teplotní úlohy.

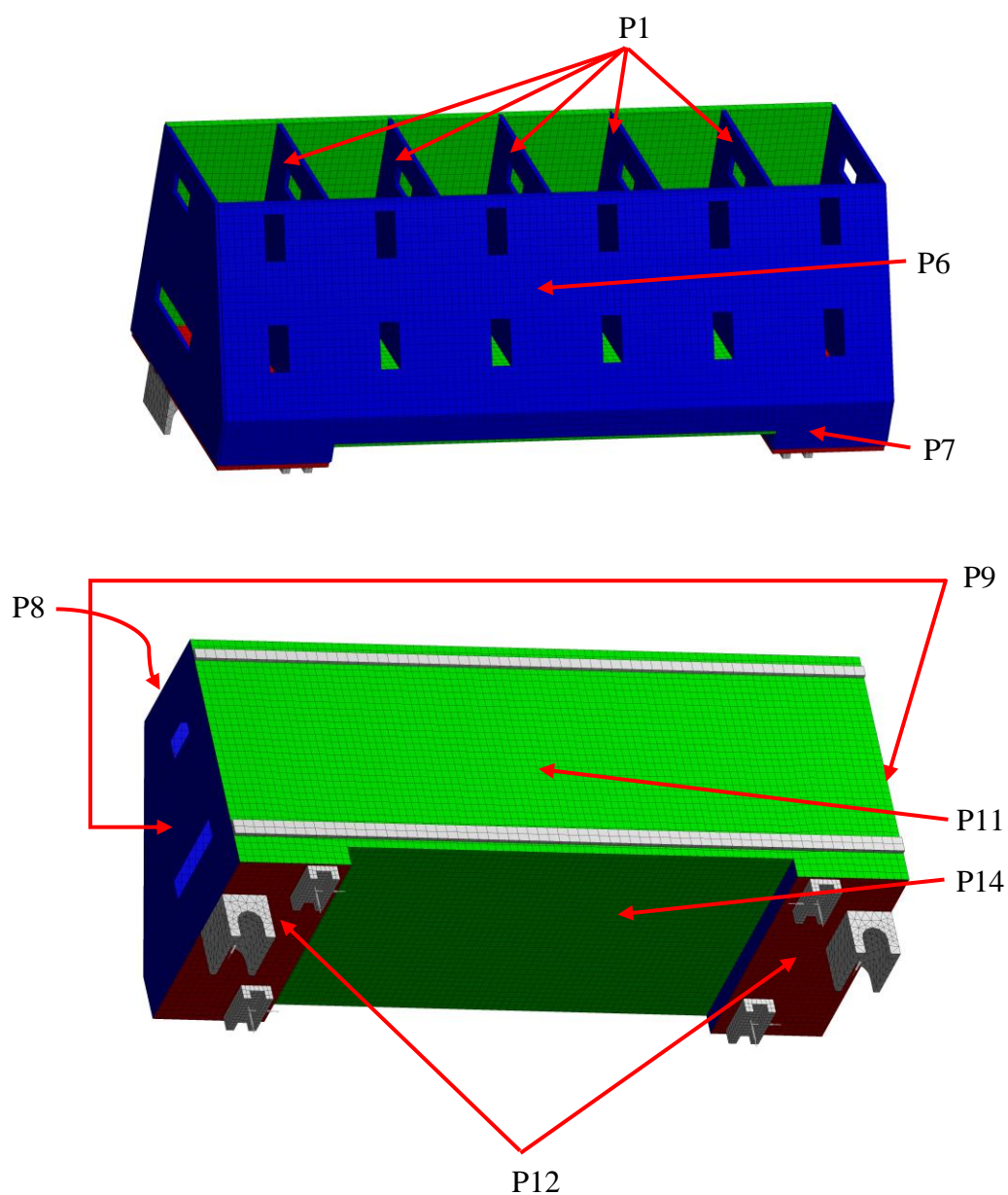
4.4. Pasivní kompenzace deformací modelu Var_1

V předchozí podkapitole 4.1. byla popsána tvorba výpočtového modelu příčnicku. Při tvorbě modelu byly záměrně použity skořepinové prvky, které lze lehce parametrizovat a měnit jejich tloušťku. Software ANSYS Workbench obsahuje rozšíření *Response surface optimization*, které slouží k nalezení optimálních hodnot vstupních parametrů tak, aby výstupní parametry nabývaly minima, maxima či se blížily předem stanovené hodnotě. Toto rozšíření využívá matematické optimalizace pomocí odezvvé plochy.

V první řadě tak bylo třeba zvolit vstupní parametry. Jako vstupní parametr byla označena každá tloušťka plochy, která je tvořena skořepinovými prvky. Vzniklo tak 14 vstupních parametrů. Některé vstupní parametry však nabývají stejných hodnot a z technologického hlediska je vhodné, aby například žebra neměla různou tloušťku. Proto byl původní počet 14 vstupních parametrů redukován na 8. Princip lze vysvětlit opět na žebrech, kterých je 5. Původně tedy vstupovalo do optimalizace 5 parametrů. Tloušťka prvního žebra je parametr P1 s hodnotou 16 mm. Hodnota tloušťky ostatních 4 žebel byla přepsána z původních 16 mm na P1. Takto byly redukovány 4 vstupní parametry. Všechny vstupní parametry a jejich hodnoty jsou na obrázku níže.

ID	Parameter Name	Value	Unit
Input Parameters			
Transient Thermal (B1)			
P1	zebro1 Thickness	16	mm
P2	zebro2 Thickness	16	mm
P3	zebro3 Thickness	16	mm
P4	zebro4 Thickness	16	mm
P5	zebro5 Thickness	16	mm
P6	sikmina Thickness	16	mm
P7	celo Thickness	16	mm
P8	strecha Thickness	16	mm
P9	bocnice1 Thickness	16	mm
P10	bocnice2 Thickness	16	mm
P11	zadni_plocha Thickness	30	mm
P12	podstava1 Thickness	40	mm
P13	podstava2 Thickness	40	mm
P14	tenka_podstava Thickness	30	mm

Obr. 4.20: Přehled vstupních parametrů a jejich hodnot.



Obr. 4.21: Zobrazení nezávislých vstupních parametrů.

Dále byly definovány 3 výstupní parametry:

- P15: Posuv bodu 1,
- P16: Posuv bodu 2,
- P17: Hmotnost příčnicku.

Tímto postupem bylo definováno celkem 11 nezávislých parametrů, z toho 8 vstupních a 3 výstupní.

Po definování parametrů bylo přistoupeno k optimalizaci pomocí již zmíněného rozšíření *Response surface optimization*, jenž se skládá ze tří modulů:

- *Design of experiments*,
- *Response surface*,
- *Optimization*.

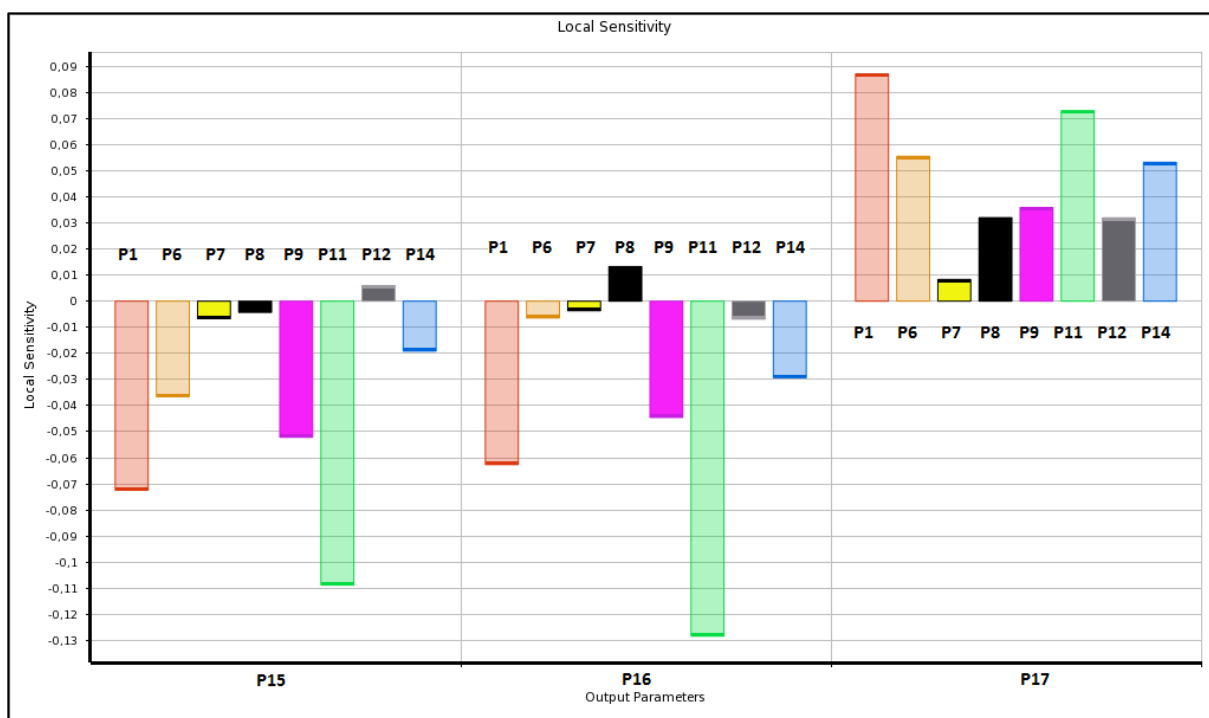
První modul *Design of experiments* byl použit k definici mezí vstupních parametrů. Ty byly stanoveny následovně:

- $P1 \pm 4 \text{ mm}$
- $P6 \pm 4 \text{ mm}$
- $P7 \pm 4 \text{ mm}$
- $P8 \pm 4 \text{ mm}$
- $P9 \pm 4 \text{ mm}$
- $P11 \pm 5 \text{ mm}$
- $P12 \pm 6 \text{ mm}$
- $P14 \pm 5 \text{ mm}$

Vyšší hodnoty mezí nebyly voleny z důvodu možného výrazného ovlivnění statických a dynamických vlastností.

Poté bylo ve stejném modulu vygenerováno 82 návrhových bodů, u nichž různě variovaly hodnoty vstupních parametrů v zadaných mezích. Počet návrhových bodů je závislý na počtu vstupních parametrů. Jelikož pro každý návrhový bod musel být proveden celý výpočet znovu (přechodová teplotní analýza pro časy 0 až 7200 sekund, statická strukturální analýza pro čas 7200 sekund), byla tato část optimalizace časově velmi náročná (cca 28 hodin).

Po vytvoření všech 81 návrhových bodů bylo přestoupeno do modulu *Response surface*, který použil výsledky ze všech návrhových bodů k vytvoření odezvové plochy pro každý výstupní parametr. V tomto modulu byla využita záložka *Local sensitivity* pro nahlédnutí výsledků citlivostní analýzy. Zde bylo zjištěno, že na velikost posuvů referenčních bodů má největší vliv $P1$ a $P11$, tedy tloušťka žeber a tloušťka plochy, na které jsou upínací lišty. Již tato analýza má velmi cenné informace a to, že zvýšení hodnot těchto parametrů vede k efektivní redukci posuvů referenčních bodů. Zároveň však zvýšení hodnot těchto parametrů nejvíce ovlivní nárůst hmotnosti. Proto je třeba najít vhodnou kombinaci vstupních parametrů, která povede ke snížení posuvů referenčních bodů a zároveň zajistí nejnížší možnou hmotnost.



Obr. 4.22: Výsledky citlivostní analýzy modelu Var_1.

V poslední fázi byl použit modul *Optimization*, kde byly zadány požadavky optimalizace. Ty zní následovně:

- Posuv referenčních bodů v čase 7200 sekund snížit o 10 %.
- Minimalizovat hmotnost konstrukce.

Name	Parameter	Objective		Constraint		
		Type	Target	Type	Lower Bound	Upper Bound
Seek P15 = 0,048443 mm; P15 <= 0,048443 mm	P15 - Total Deformation 2 Maximum Maximum Value Over Time	Seek Target	0,048443	Values <= Upper Bound		0,048443
Seek P16 = 0,033954 mm; P16 <= 0,033954 mm	P16 - Total Deformation 3 Maximum Maximum Value Over Time	Seek Target	0,033954	Values <= Upper Bound		0,033954
Minimize P17	P17 - Geometry Mass	Minimize		No Constraint		

Obr. 4.23: Cíle optimalizace zadávané v modulu *Optimization*.

Všem třem výstupním parametrům byla nastavena vysoká priorita. Pro samotnou optimalizaci byla zvolena metoda screening s maximálním počtem vzorků 10 000. Jako výsledek optimalizace program ANSYS navrhne 3 nejlepší kombinace vstupních parametrů a zároveň hodnoty výstupních parametrů pro jednotlivé kombinace. Každá tato kombinace je v programu nazvána *candidate point* (dále kandidát).

P15 - Total Deformation 2 Maximum Maximum Value Over Time (mm)		P16 - Total Deformation 3 Maximum Maximum Value Over Time (mm)		P17 - Geometry Mass (kg)	
Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
— 0,048179	0,00 %	— 0,033904	0,00 %	XX 1915,2	0,00 %
— 0,047856	-0,67 %	— 0,033908	0,01 %	XX 1952,3	1,94 %
— 0,046699	-3,07 %	— 0,033566	-1,00 %	XX 2023,9	5,68 %

Obr. 4.24: Výstupní parametry 3 nejlepších kombinací.

Předepsané limity parametrů P15 a P16 byly splněny u všech tří kandidátů. Nejnižší hmotnosti dosahuje první kandidát. Jako nejlepší byl zvolen první kandidát, a to z důvodu, že procentuální zvýšení hmotnosti (P17) ostatních dvou kandidátů není vyváжено procentuálním snížením deformací. Tento kandidát bude v dalším označován jako Var_2.

Porovnání původní konfigurace Var_1 a optimalizované Var_2 je v následující tabulce.

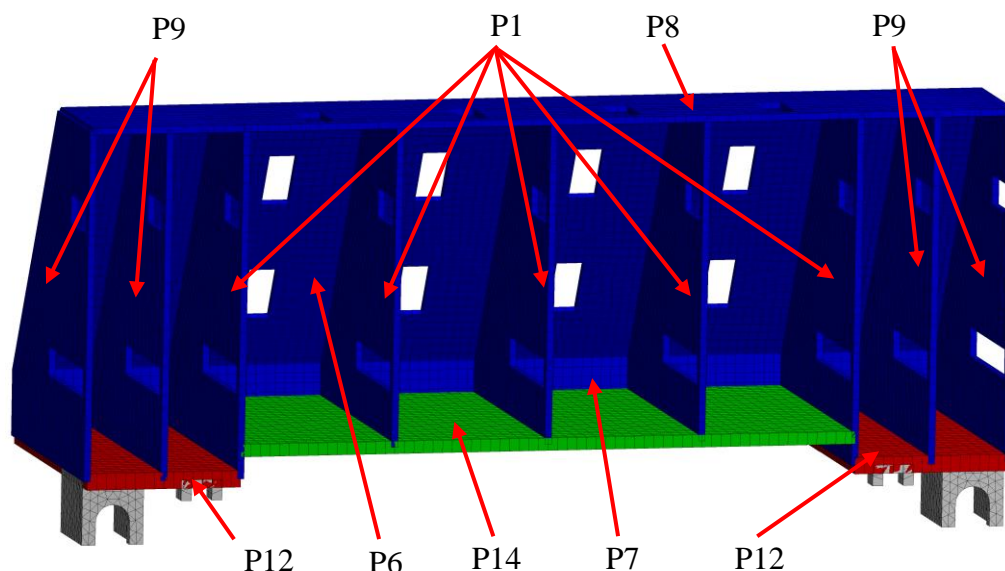
Tab. 4.1: Porovnání vstupních a výstupních parametrů modelů Var_1 a Var_2.

Parametr	Var_1	Var_2
P1-žebra [mm]	16	19,76
P6-šikmina [mm]	16	17,24
P7-čelo [mm]	16	19,38
P8-střecha [mm]	16	13,82
P9-bočnice [mm]	16	19,86
P11-zadní plocha [mm]	30	34,20
P12-podstavy [mm]	40	37,15
P14-podstava tenká [mm]	30	31,82
P15-deformace 1 [μm]	53,826	48,179
P16-deformace 2 [μm]	37,727	33,904
P17-hmotnost [kg]	1750	1915,2

Závěrem lze prohlásit, že snížení posuvů přibližně o 10,5 % (P15), respektive 10,1 % (P16) je vykoupeno 9,4% nárůstem hmotnosti. Porovnání posuvů ostatních bodů lišty modelů Var_1 a Var_2 je v kapitole 4.6. Hodnoty výstupních parametrů v kapitole 4.6 pro Var_2 jsou mírně odlišné, a to z důvodu zaokrouhlení vstupních parametrů a provedením přímého výpočtu teplotní a statické analýzy, nikoliv odvozením z matematické optimalizace pomocí odezvové plochy.

4.5. Výpočtový model Var_3

Vzhledem k tomu, že u modelu Var_2 bylo dosaženo snížení teplotních deformací u vybraných bodů, ale došlo k výraznému nárůstu hmotnosti, byla vytvořena třetí varianta Var_3. Tato konfigurace vychází z Var_1, jediná změna geometrie spočívá v přidání 2 žeber a odebrání otvorů, které by nově přidaná žebra přehradila.

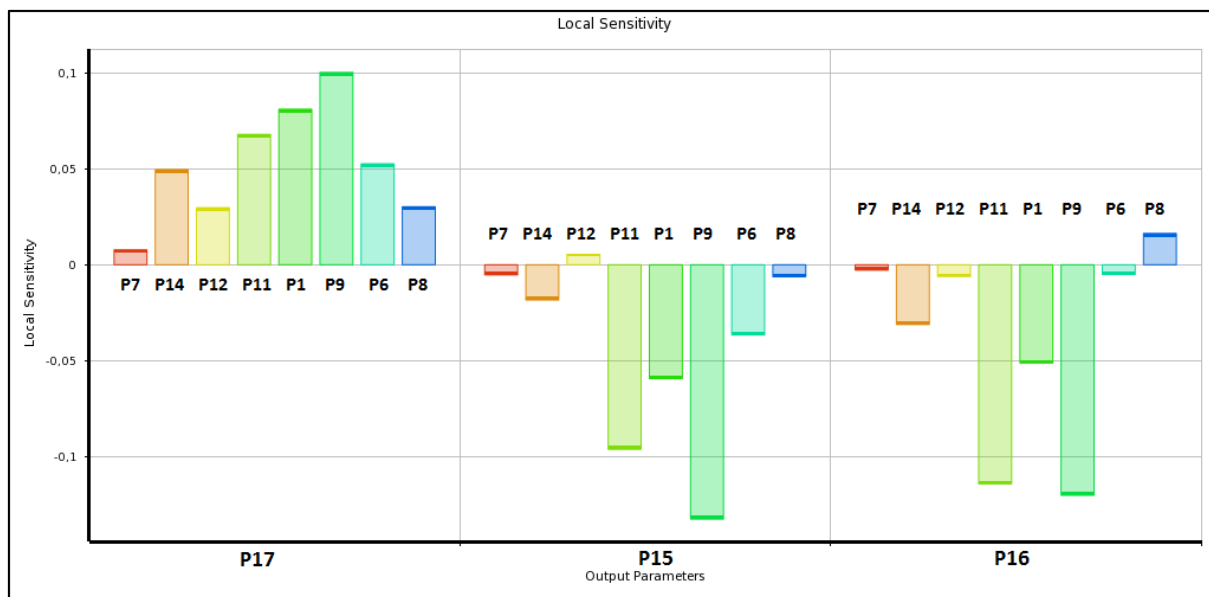


Obr. 4.25: Vstupní parametry modelu Var_3.

Výpočtový model se tak změnil pouze v geometrii a počtu prvků, který vzrostl na 22 427. Tloušťky stěn byly parametrizovány stejně jako u modelu Var_1, nově přidaným žebřům byla přiřazena tloušťka P9 (16 mm). Parametr P11 zůstal přiřazený tloušťce stěny, na níž jsou lišty. Vzniklo tak opět stejných 8 nezávislých vstupních parametrů se stejnými mezemi jako v kapitole 4.4. Jako výstupní parametry byly předepsány posuvy stejných vztažných bodů a celková hmotnost. Číslování parametrů zůstalo stejné. Následovala optimalizace se stejnými cíli jako předchozí:

- Posuv referenčního bodu 1 snížit pod 48,443 μm .
- Posuv referenčního bodu 2 snížit pod 33,954 μm .
- Minimalizovat hmotnost.

Po vypočtení všech 82 návrhových bodů a vytvoření odezvové plochy bylo nahlédnuto do výsledků citlivostní analýzy.



Obr. 4.26: Citlivostní analýza modelu Var_3.

Z obrázku 4.26 vyplývá, že efektivní redukce posuvů referenčních bodů (P15, P16) spočívá ve zvýšení tloušťky stěn odpovídajícím P9, P11 a P1. Tyto parametry však způsobí nejvyšší nárůst hmotnosti (P17).

V posledním kroku bylo opět pomocí metody *screening* vygenerováno 10 000 vzorků a vybrání 3 nejlepší kandidáti.

Geometry Mass (kg)		Total Deformation Maximum (mm)		Total Deformation 2 Maximum (mm)	
Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference	Parameter Value	Variation from Reference
★ 1707,3	0,00 %	— 0,048442	0,00 %	— 0,033616	0,00 %
★ 1711,8	0,26 %	— 0,048321	-0,25 %	— 0,03371	0,28 %
★ 1757,8	2,96 %	— 0,04809	-0,73 %	— 0,033946	0,98 %

Obr. 4.27: Výstupní parametry

První kandidát dosahuje nejnižší hmotnosti a nejnižšího posuvu referenčního bodu 2. Zbylí dva kandidáti oproti prvnímu vykazují menší posuv referenčního bodu 1. Tato výhoda je však u obou převážena vyššími hodnotami hmotnosti a posuvu referenčního bodu 1. Proto byl jako nejlepší kandidát zvolen právě první kandidát, který bude dále uváděn jako Var_3. Jeho parametry jsou uvedeny v následujícím oddílu v porovnání s Var_1 a Var_2. Výstupní parametry v kapitole 4.6 jsou opět mírně odlišné, z důvodu zaokrouhlení vstupních parametrů a provedení přímého výpočtu teplotní a statické analýzy.

4.6. Výsledky, porovnání, doporučení

V první části tohoto oddílu jsou uvedeny vstupní a výstupní parametry tří variant příčniku.

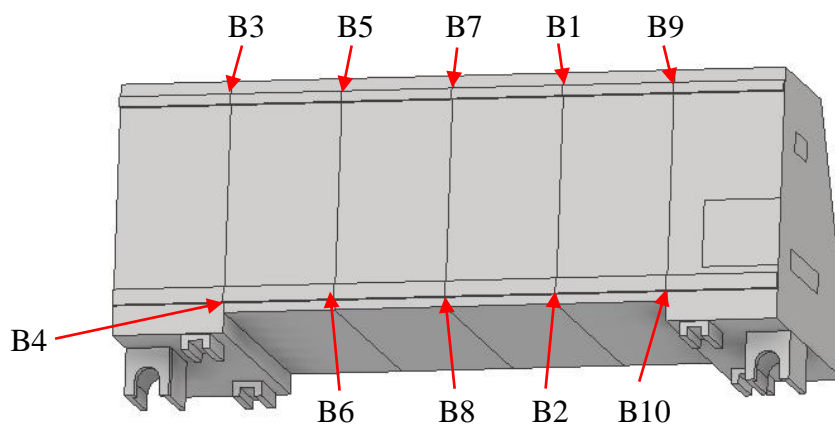
- Var_1 – původní konfigurace.
- Var_2 – optimalizovaná původní konfigurace.
- Var_3 – nová optimalizovaná konfigurace.

Tloušťky stěn modelů Var_2 a Var_3 získané matematickou optimalizací byly zaokrouhleny na jedno desetinné místo a byla provedena přechodová teplotní analýza, následovaná statickou strukturální analýzou pro 24 časových okamžiků s konstantním odstupem (5 minut).

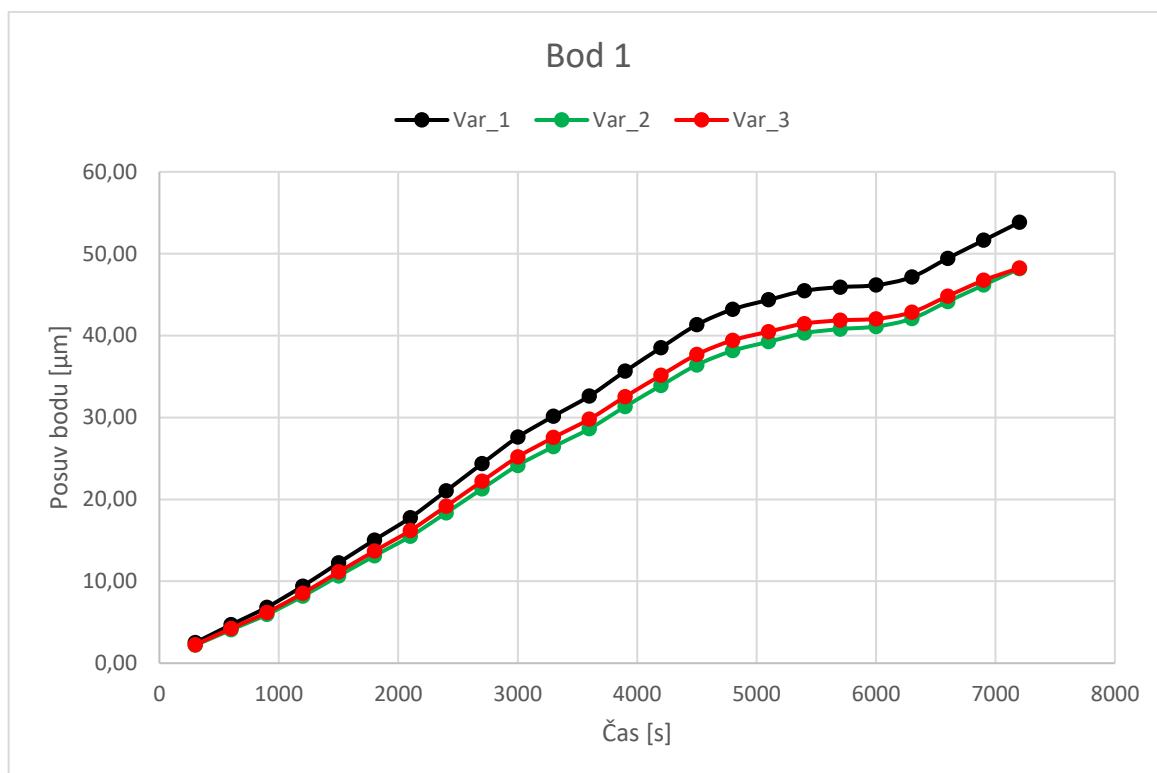
Tab. 4.2: Porovnání parametrů tří variant příčniku.

Parametr	Var_1	Var_2	Var_3
P1 [mm]	16	19,8	13,5
P6 [mm]	16	17,2	13,1
P7 [mm]	16	19,4	15,7
P8 [mm]	16	13,8	18,8
P9 [mm]	16	19,9	16,3
P11 [mm]	30	34,2	27,7
P12 [mm]	40	37,2	37,8
P14 [mm]	30	31,9	25,8
P15 - posuv bodu 1 [μm]	53,83	48,17	48,28
P16 - posuv bodu 2 [μm]	37,73	33,87	33,70
P17 - hmotnost [kg]	1750	1916,6	1742,7

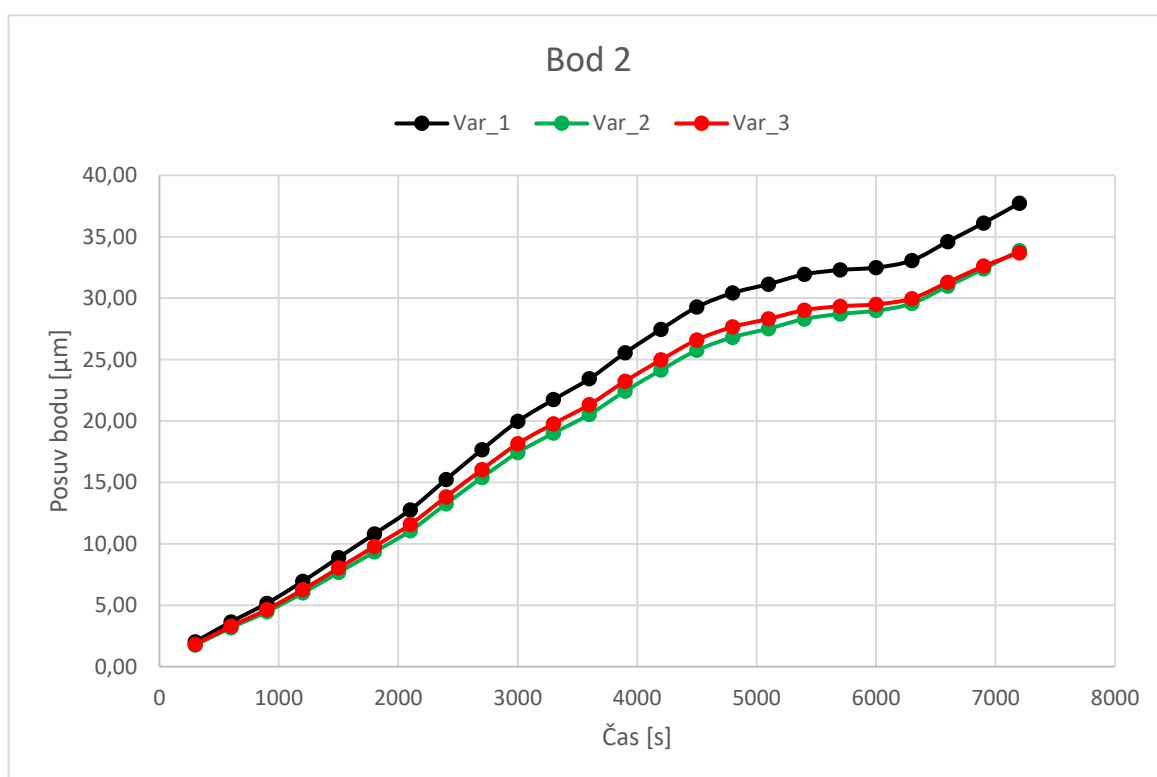
K prohlášení o zlepšení teplotně-deformačního chování příčniku je třeba zhodnotit jeho deformace více globálně, nestačí pouze porovnat posuvy dvou bodů na konci zatěžování. Z tohoto důvodu bylo zvoleno dalších 8 referenčních bodů (viz obr. 4.28). Celkové vyhodnocení se tedy bude skládat z porovnání posuvů v 10 bodech po dobu zátěžného cyklu (120 minut). Tato doba bude rozdělena na 24 časových okamžiků, tak jako statická strukturální analýza.



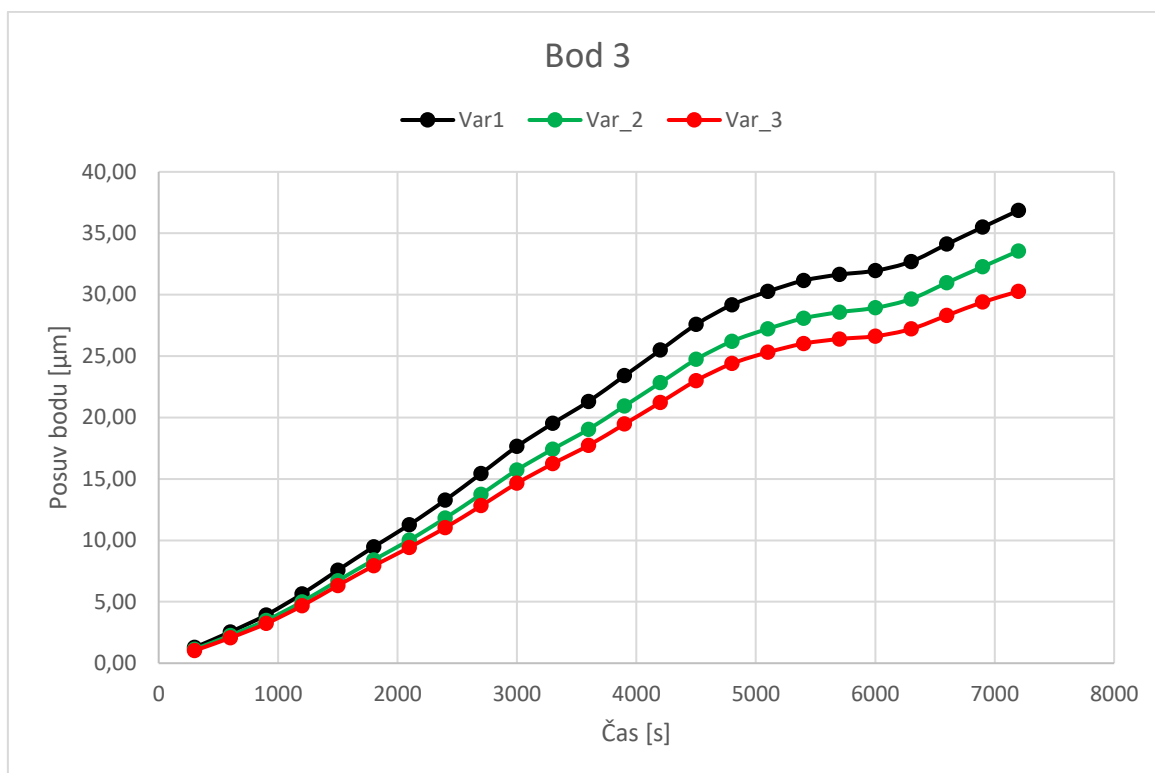
Obr. 4.28: Referenční body.



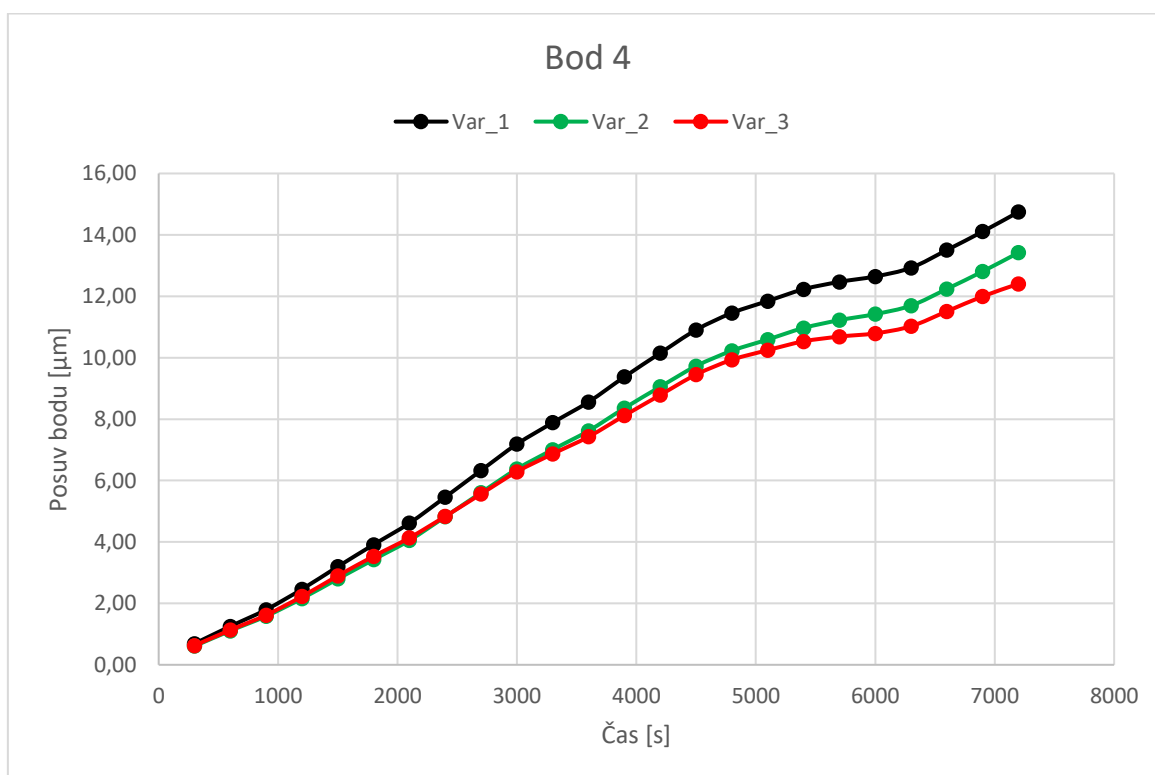
Obr. 4.29: Celkový posuv referenčního bodu 1.



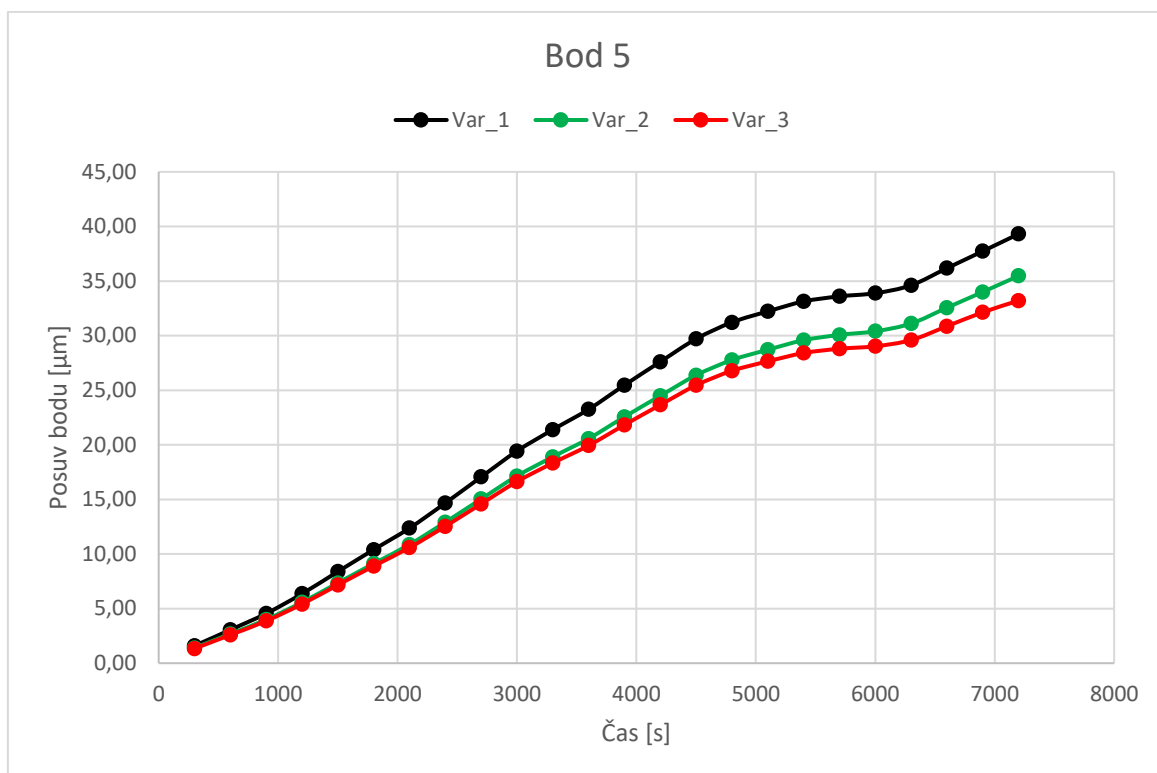
Obr. 4.30: Celkový posuv referenčního bodu 2.



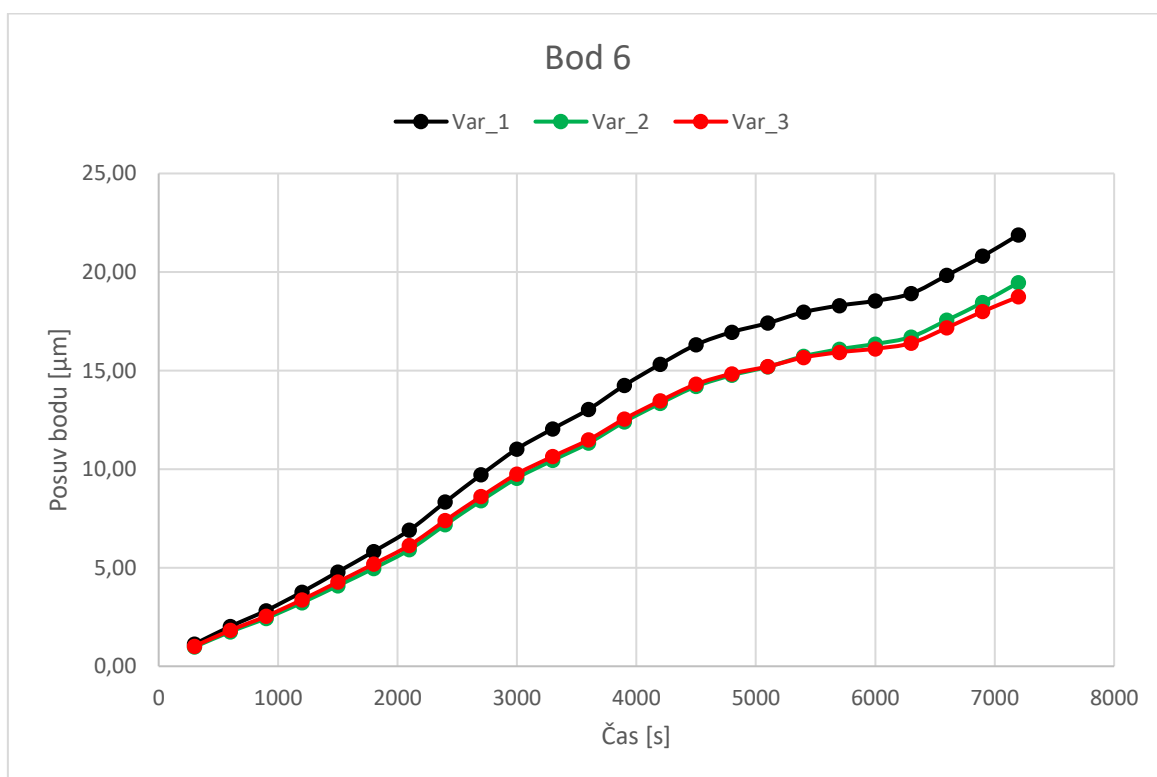
Obr. 4.31: Celkový posuv referenčního bodu 3.



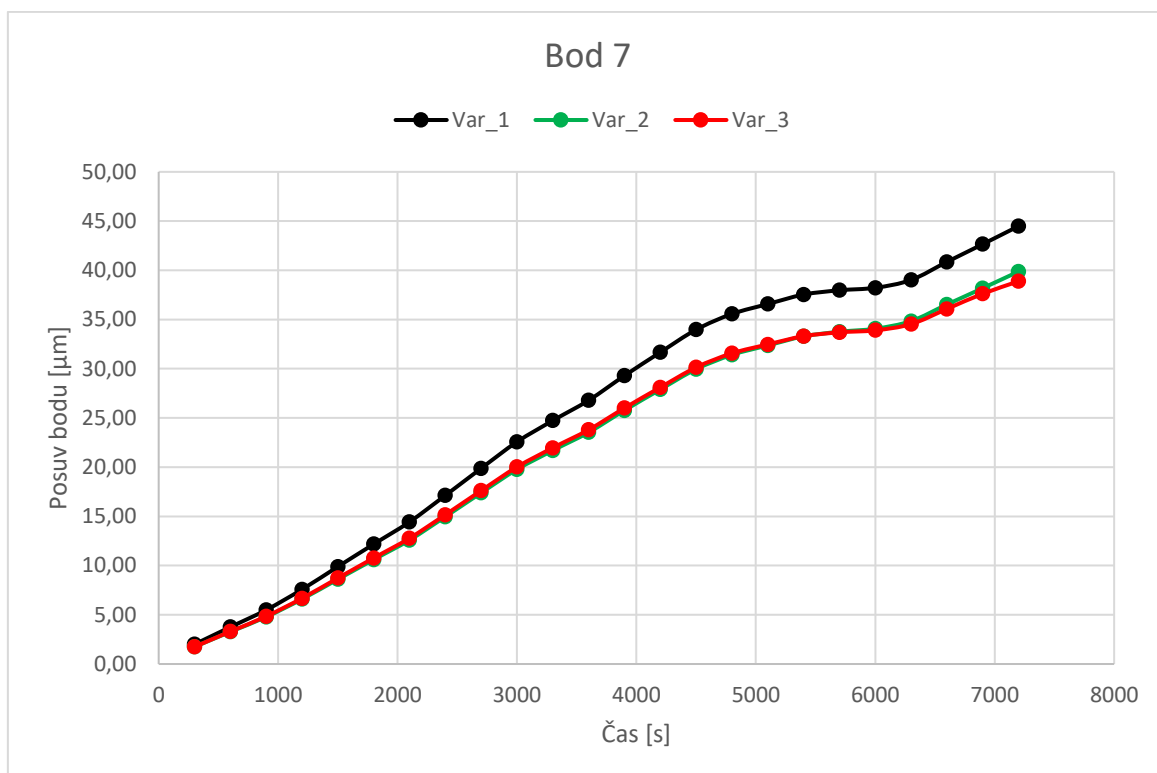
Obr. 4.32: Celkový posuv referenčního bodu 4.



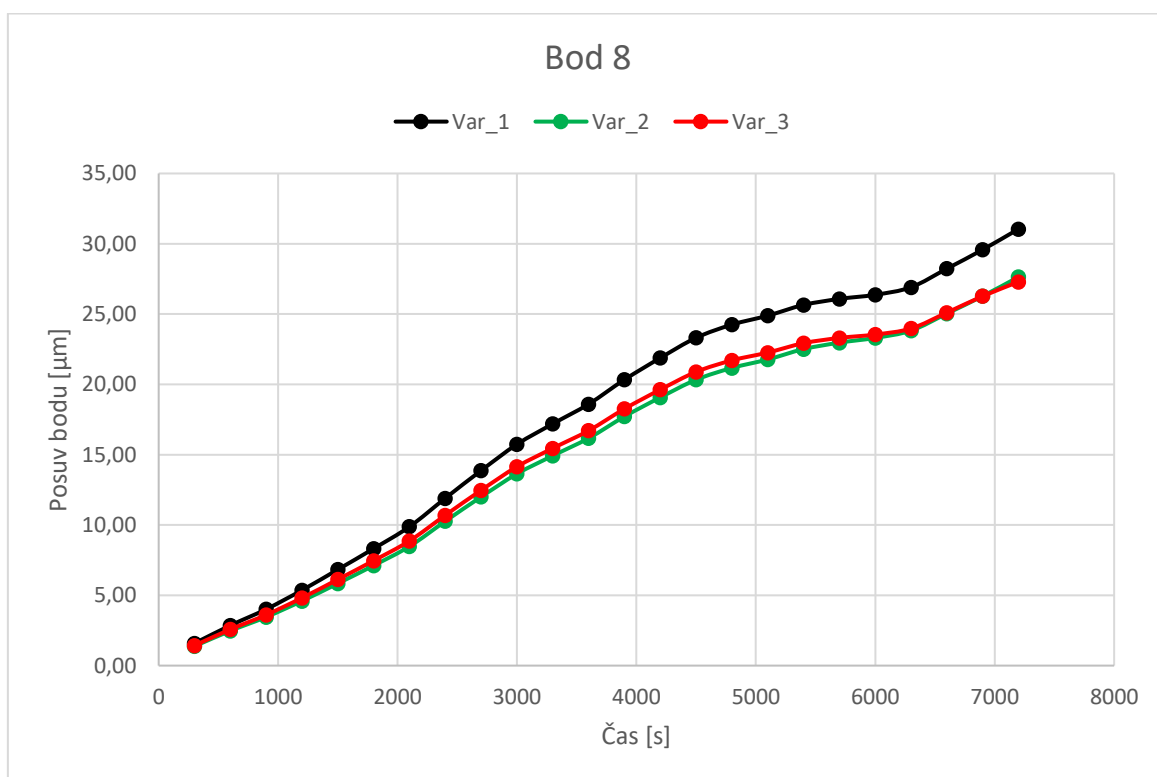
Obr. 4.33: Celkový posuv referenčního bodu 5.



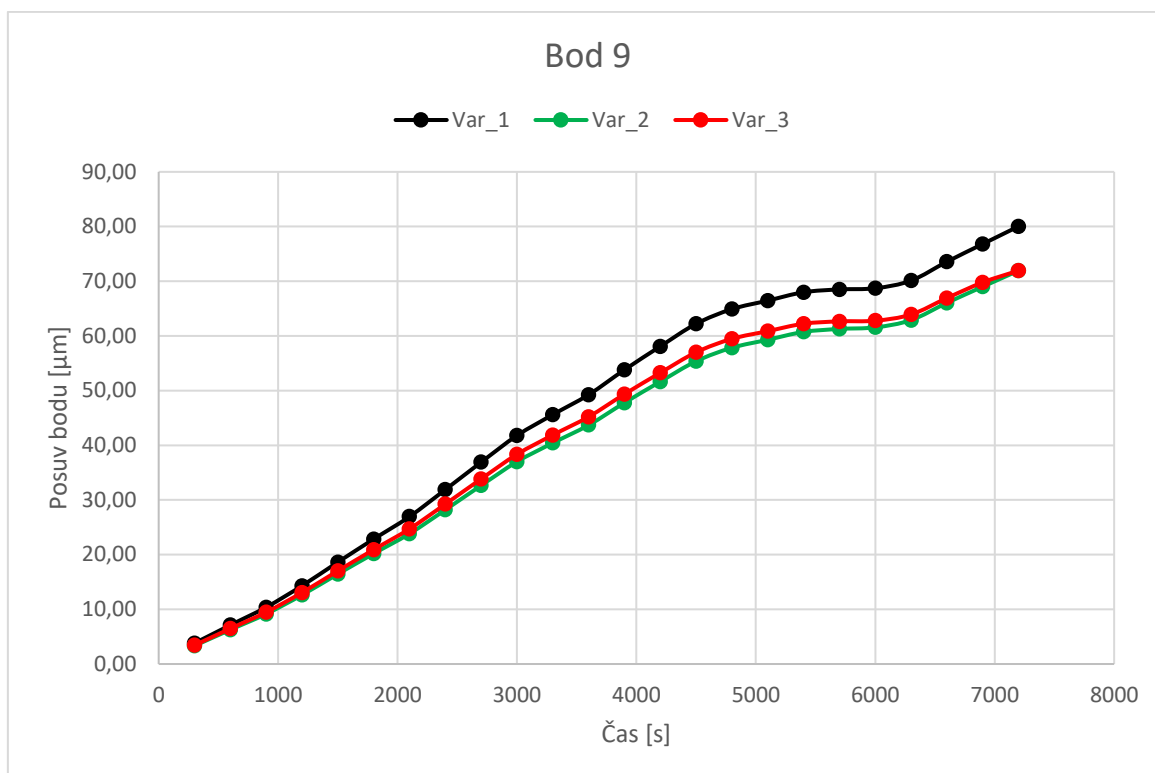
Obr. 4.34: Celkový posuv referenčního bodu 6.



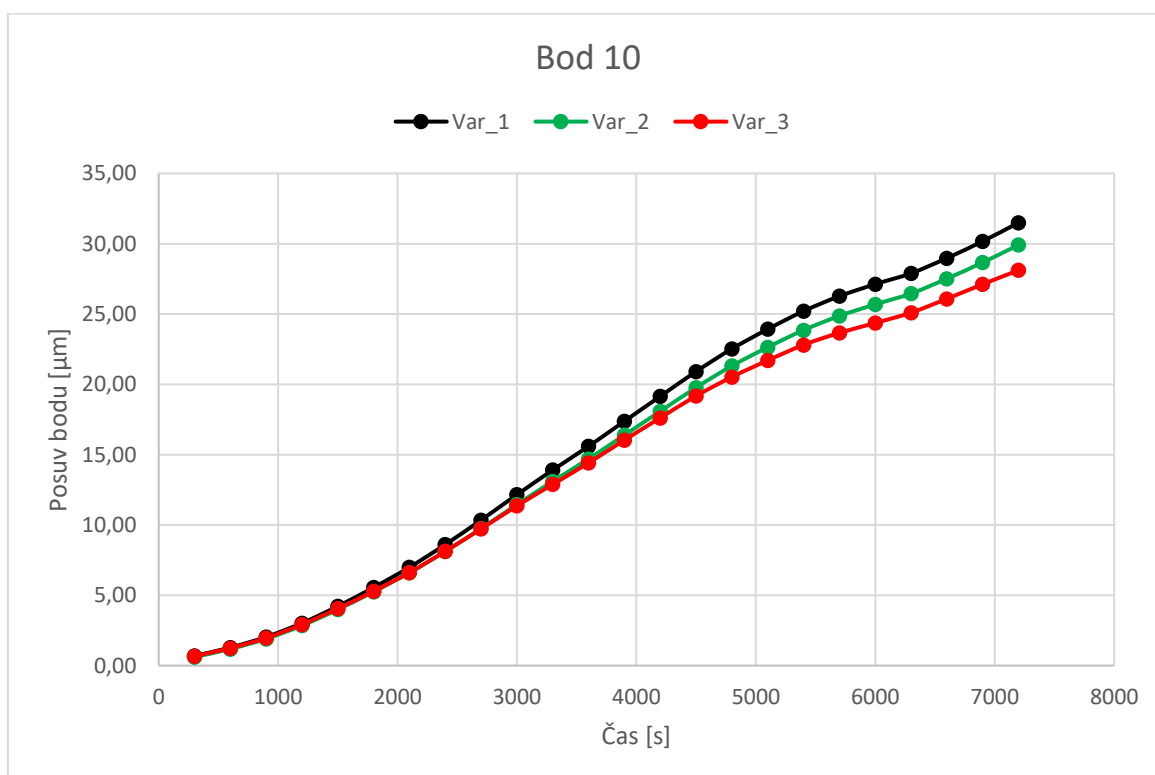
Obr. 4.35: Celkový posuv referenčního bodu 7.



Obr. 4.37: Celkový posuv referenčního bodu 8.



Obr. 4.36: Celkový posuv referenčního bodu 9.



Obr. 4.38: Celkový posuv referenčního bodu 10.

Z grafů je patrné, že jak model Var_2 tak i Var_3 vykazují menší posuvy referenčních bodů oproti původnímu modelu Var_1. Také lze pozorovat nižší hodnoty posuvů u bodů ležících na spodní liště. V tabulce 4.3 je vypočteno průměrné procentuální snížení posuvů jednotlivých referenčních bodů vůči původní konfiguraci Var_1.

Tab. 4.3: Porovnání průměrných procentuálních změn posuvů vůči Var_1.

	Bod 1	Bod 2	Bod 3	Bod 4	Bod 5	Bod 6	Bod 7	Bod 8	Bod 9	Bod 10	Průměr
Var_2	-12,0	-12,2	-10,4	-10,9	-11,3	-13,0	-11,9	-12,9	-11,1	-5,9	-11,16
Var_3	-9,1	-9,4	-17,0	-12,5	-14,6	-11,9	-11,6	-10,4	-8,6	-7,2	-11,23

Hodnoty procentuálních změn posuvů v tabulce byly zaokrouhleny na 1 desetinné místo. Z nezaokrouhlených hodnot byla spočítána průměrná procentuální změna posuvů všech bodů vůči Var_1 pro Var_2 i Var_3. Výsledky zní následovně:

- Výpočtový model Var_2 vykazuje průměrné snížení posuvů v referenčních bodech o **11,16 %** oproti původnímu modelu Var_1. Zároveň došlo k nárůstu hmotnosti o **9,52 %** oproti modelu Var_1.
- Výpočtový model Var_3 vykazuje průměrné snížení posuvů v referenčních bodech o **11,23 %** oproti původnímu modelu Var_1. Hmotnost modelu Var_3 je o **0,42 %** nižší než hmotnost modelu Var_1.

Výstupem praktické části jsou tedy 2 upravené konfigurace příčnicku, které vykazují vyšší stabilitu z hlediska posuvů klíčových bodů upínací lišty. Z hlediska použitelnosti výsledků je třeba zdůraznit, že analyzováno bylo pouze teplotně-deformační chování na modelovém typu zatížení. Zatížení bylo modelováno tak, aby šlo výsledky analýz experimentálně ověřit. Experimentální verifikace modelu však z finančních a časových důvodů nebyla možná. Pro úplné posouzení zlepšení vlastností, by bylo třeba provést analýzu statického a dynamického chování příčnicku a následné propojení s výsledky této práce. Model by po menších úpravách měl být použitelný i pro analýzy statického a dynamického chování, což by mohl být předmět další práce.

5. ZÁVĚR

Hlavním cílem předložené diplomové práce bylo snížit teplotní deformace u vybrané části obráběcího stroje pomocí pasivní kompenzace.

Po úvodní kapitole byl pomocí systémového přístupu formulován problém. Dále byla popsána řešená soustava, charakterizován systém podstatných veličin a zvolena metoda řešení.

Následovala kapitola zabývající se rešeršním zpracováním informací týkajících se problematiky tepla ve spojení s obráběcími stroji. Zde byly uvedeny a popsány základní faktory ovlivňující celkovou teplotní chybu. Následovalo vysvětlení základních pojmů termomechaniky. V oddíle věnujícímu se termomechanice byla věnována pozornost spíše části týkající se přenosu tepla, a to hlavně v návaznosti na metodu konečných prvků, které byla věnována další část., kde byla stručně popsána podstata této metody. Kapitola pokračovala oddílem uvádějícím rozdělení metod, které slouží k redukci teplotních chyb u obráběcích strojů. Jednou z nich je pasivní kompenzace, která byla využita v praktické části.

Čtvrtá kapitola se zabývala tvorbou výpočtového modelu, na který byla následně aplikována matematická optimalizace. Tvorba výpočtového modelu se skládala z několika částí: tvorba nového modelu geometrie, vytvoření modelu materiálu, zatížení, kontaktů a vazeb. Dále proběhla diskretizace modelu geometrie na konečnoprvkový model. Tím byl vytvořen výpočtový model Var_1. Tento model byl pomocí matematické optimalizace upraven tak, aby došlo k 10% snížení posuvů ve 2 referenčních bodech za požadavku minimalizace hmotnosti. Výsledkem byl nový model Var_2. Jelikož ale došlo k poměrně vysokému nárůstu hmotnosti, byl model Var_1 konstrukčně upraven a proces matematické optimalizace byl proveden znovu. Výsledkem byl výpočtový model Var_3. V poslední části je porovnáno teplotně-deformační chování všech tří variant. Dále je uvedena použitelnost modelu pro ostatní typy analýz a možnost návaznosti dalších prací.

Závěrem lze výsledky shrnout následovně:

- U obou nových konfigurací příčnicku (Var_2, Var_3) došlo k požadovanému snížení teplotních deformací.

Tímto lze prohlásit, že cíle diplomové práce byly splněny v plném rozsahu.

POUŽITÉ ZDROJE

- [1] JANÍČEK, P. Systém podstatných veličin na objektu, Systémové pojetí vybraných oborů pro techniky: Hledání souvislostí. 1. Vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. str. 682. ISBN 978-80-214-3545.
- [2] BRYAN, J. International Status of Thermal Error Research (1990). CIRP Annals Manufacturing Technology. 1990, 39(2), 645-656.
DOI: 10.1016/S0007-8506(07)63001-7. ISSN 00078506.
- [3] Pokročilé teplotní kompenzace portálového obráběcího centra. MM Průmyslové spektrum. 2013, 2013(10), 16. ISSN 1212-2572.
- [4] JANÍČEK, Přemysl. Mechanika těles: pružnost a pevnost I. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2592-X.
- [5] SAS IP, INC. Ansys Mechanical APDL Theory Reference 15.0. 2013.
- [6] Useful Practical applications of Thermal Expansion-Physics Concepts. Education Timess [online]. 2016 [cit. 2016-11-25].
Dostupné z: <http://educationtimess.com/useful-practical-applications-thermal-expansion-define-thermal-expansion/>
- [7] TERMOMECHANIKA PRO STUDENTY STROJNÍCH FAKULT [online]. In: PAVELEK, Milan. Brno, 2013, s. 9 [cit. 2017-03-26].
Dostupné z: http://ottp.fme.vutbr.cz/~pavelek/termo/00_Uvod.pdf
- [8] PAVELEK, Milan. Termomechanika. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [9] PETRUŠKA, Jindřich. MKP v inženýrských výpočtech: Studijní opora [online]. 112 s. [cit. 2017-04-12].
Dostupné z: <http://www.umt.fme.vutbr.cz/img/fckeditor/file/opory/RIV/MKP2011.pdf>
- [10] HOREJŠ, Otakar, Martin MAREŠ a Lukáš NOVOTNÝ. Advanced Modelling of Thermally Induced Displacements and Its Implementation into Standard CNC Controller of Horizontal Milling Center. Procedia CIRP. 2012, 4, 67-72.
DOI: 10.1016/j.procir.2012.10.013. ISSN 22128271.

- [11] CAO, Huajun, Libin ZHU, Xianguang LI, Peng CHEN a Yongpeng CHEN. Thermal error compensation of dry hobbing machine tool considering workpiece thermal deformation. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. DOI: 10.1007/s00170-015-8314-5. ISSN 0268-3768.
- [12] MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, s.r.o., 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [13] ŠTĚDRÝ, Jan. Vliv odměřování na přesnost obráběcích strojů. MM Průmyslové spektrum. 2009, 2009(11), 26. ISSN 1212-2572.
- [14] BORO VAN, Petr. Cesty ke zvýšení produktivity při obrábění složitých obrobků (4). Technický týdeník [online]. 2015 [cit. 2017-01-09].
Dostupné z: http://www.technickytydenik.cz/rubriky/serialy/ze-zivota-vyzkumneho-centra/cesty-ke-zvyseni-produktivity-pri-obrabeni-slozitych-obrobku-4_30729.html
- [15] Mize, C. D. et al., 2000. Neural network thermal error compensation of a machining center, Precision Engineering, Vol. 24, pp 338-346. ISSN 01416359.
- [16] Lee, J. H. et al., 2001. Thermal error modeling of a horizontal machining center using fuzzy logic strategy, J Manuf. Process, Vol. 3, pp 120-127.
- [17] HOREJŠ, Otakar a Martin MAREŠ. Kompenzace teplotních úhlových chyb strojů. MM Průmyslové spektrum. 2014, 2014(4), 52-53. ISSN 1212-2572.
- [18] Roller Rail Systems: Roller Runner Blocks, Roller Guide Rails, Accessories. Ernst-Sachs-Straße 100, 97424 Schweinfurt, Germany, 2015, 200 s.
Dostupné také z: <https://www.boschrexroth.com/en/xc/>
- [19] NOVÁČEK, M. Kuličkové šrouby pro posuvové soustavy s dlouhým zdvihem. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 68 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Jiří Marek, Dr.
- [20] PRODUKTOVÝ KATALOG: KULIČKOVÉ ŠROUBY KUŘIM, a.s. Blanenská 1277 664 34 Kuřim, 2013. Dostupné také z: <http://www.ksk-pm.cz/>

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	jednotka	Popis
L_0	[m]	původní délka
L	[m]	konečná délka
T	[K]	teplota
T_{ref}	[K]	původní teplota
α^{se}	[K ⁻¹]	teplotně závislý sečný vektor koeficientů teplotní roztažnosti
ε^{th}	[-]	vektor tepelného přetvoření
m	[kg]	hmotnost
c	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita
S	[m ²]	plocha
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost
\dot{q}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok
\dot{Q}	[W]	celkový tepelný tok
α	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	lokální součinitel přestupu tepla
T_s	[K]	teplota stěny
T_t	[K]	teplota tekutiny
E_0	[W·m ⁻²]	zářivost černého tělesa
σ	[W·m ⁻² ·K ⁻⁴]	Stefan-Boltzmannova konstanta
ε_λ	[-]	poměrná zářivost
λ	[m]	vlnová délka (strana 25)
Q	[W·m ⁻³]	měrný tepelný výkon
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota
t	[s]	čas
u, v, w	[m]	posuvy ve směru osy x, y, z
$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$	[-]	délková přetvoření
$\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$	[-]	úhlový zkos
$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$	[Pa]	normálová napětí
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	[Pa]	smyková napětí
U	[J]	celková potenciální energie
W	[J]	energie napjatosti
P	[J]	potenciál vnějšího zatížení
Ω	[m ³]	objem tělesa
Γ_P	[m ²]	hranice tělesa
\mathbf{u}^T	[m]	matice posuvů
ε^T	[-]	matice přetvoření

σ^T	[Pa]	matice napětí
\mathbf{o}^T	[N·m ⁻³]	matice objemového zatížení
\mathbf{p}^T	[Pa]	matice plošného zatížení
\mathbf{C}_T	[W]	globální matice tepelné kapacity
\mathbf{U}_T	[K]	matice neznámých uzlových teplot
\mathbf{K}_T	[W·K ⁻¹]	globální matice tepelné vodivosti
\mathbf{F}_T	[W]	matice tepelného zatížení
E	[MPa]	modul pružnosti v tahu
λ	[W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	tepelná vodivost
α	[K ⁻¹]	součinitel délkové roztažnosti
G	[MPa]	modul pružnosti ve smyku
k	[N·m ⁻¹]	tuhost
F	[N]	síla
δ	[m]	deformace (posuv)
d_w	[mm]	průměr kuličky
α	[°]	úhel dosedu kuličky
d_c	[mm]	průměr dosedu na šroubu
L	[mm]	uvažovaná vzdálenost mezi axiálním ložiskem a maticí
d_{pw}	[mm]	roztečný průměr hřídele

Zkratka**Popis**

CAD	computer aided design
CAE	computer aided engineering
MKP	metoda konečných prvků
CFRP	carbon fiber reinforced polymer
TCP	tool center point
FS, ČVUT	Fakulta strojní, České vysoké učení technické v Praze
VCSVTT	Výzkumné centrum pro strojírenskou výrobní techniku a technologii
PF	přenosová funkce
MLR	multilinear regression
ANN	artificial neural network
TF	transfer function
KŠM	kuličkový šroub a matice
MPC	multipoint constraint

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1: Schéma obráběcího centra s popisem hlavních částí.	16
Obr. 2.2: Pohled na příčnick zepředu (nahore) a příčnick v řezu (dole).	17
Obr. 2.3: Zadní pohled na příčnick.	18
Obr. 3.1: Diagram tepelných účinků na obráběcí stroj.	22
Obr. 3.2: Dilatační mezery na kolejnicích.	24
Obr. 3.3: Schéma termodynamické soustavy.	25
Obr. 3.4: Metody redukce teplotních chyb.	31
Obr. 3.5: Teploty v kuličkovém šroubu při obrábění.	32
Obr. 3.6: Schéma nepřímé kompenzace.	33
Obr. 3.7: Porovnání kompenzačních metod.	34
Obr. 3.8: Schéma kompenzovaného stroje s C-ráme.	35
Obr. 3.9: Průběhy úhlových deformací a topných výkonů.	36
Obr. 4.1: Princip tvorby nového modelu geometrie.	37
Obr. 4.2: Původní objemový model (nahore) a nový objemový model (dole).	38
Obr. 4.3: Pohled na příčnick s barevným vyznačením tloušťky stěn v mm.	39
Obr. 4.4: Lineární vedení FNS-1851.	40
Obr. 4.5: Tuhostní charakteristiky lineárního vedení.	41
Obr. 4.6: Vztažné plochy (modře) pro spring prvky.	41
Obr. 4.7: Vztažné plochy (modře) pro spring prvek.	43
Obr. 4.8: Průběh tepelného toku v čase.	44
Obr. 4.9: Průběh teploty okolního vzduchu.	44
Obr. 4.10: Plocha (žlutá) zatížená tepelným tokem.	45
Obr. 4.11: Ukázka sítě konečných prvků modelu Var_1.	46
Obr. 4.12: Schéma analýz v programu ANSYS Workbench.	47
Obr. 4.13: Referenční body.	48
Obr. 4.14: Závislost posuvu bodu 1 na počtu prvků.	48
Obr. 4.15: Závislost posuvu bodu 2 na počtu prvků.	49
Obr. 4.16: Deformovaný tvar modelu Var_1.	49
Obr. 4.17: Průběh posuvu referenčního bodu 1.	50
Obr. 4.18: Posuv referenčního bodu 2.	50
Obr. 4.19: Výsledky teplotní úlohy.	51
Obr. 4.20: Přehled vstupních parametrů a jejich hodnot.	52
Obr. 4.21: Zobrazení nezávislých vstupních parametrů.	53
Obr. 4.22: Výsledky citlivostní analýzy modelu Var_1.	55
Obr. 4.23: Cíle optimalizace zadávané v modulu Optimization.	55

Obr. 4.24: Výstupní parametry 3 nejlepších kombinací.....	56
Obr. 4.25: Vstupní parametry modelu Var_3.....	57
Obr. 4.26: Citlivostní analýza modelu Var_3.....	58
Obr. 4.27: Výstupní parametry	58
Obr. 4.28: Referenční body.	59
Obr. 4.29: Celkový posuv referenčního bodu 1.....	60
Obr. 4.30: Celkový posuv referenčního bodu 2.....	60
Obr. 4.31: Celkový posuv referenčního bodu 3.....	61
Obr. 4.32: Celkový posuv referenčního bodu 4.....	61
Obr. 4.33: Celkový posuv referenčního bodu 5.....	62
Obr. 4.34: Celkový posuv referenčního bodu 6.....	62
Obr. 4.35: Celkový posuv referenčního bodu 7.....	63
Obr. 4.37: Celkový posuv referenčního bodu 8.....	63
Obr. 4.36: Celkový posuv referenčního bodu 9.....	64
Obr. 4.38: Celkový posuv referenčního bodu 10.....	64

SEZNAM TABULEK

Tab. 2.1: Použitý software a hardware.	20
Tab. 3.1: Analogie teplotní a deformačně-napěťové analýzy.	31
Tab. 4.1: Porovnání vstupních a výstupních parametrů modelů Var_1 a Var_2.	56
Tab. 4.2: Porovnání parametrů tří variant příčnicku.	59
Tab. 4.3: Porovnání průměrných procentuálních změn posuvů vůči Var_1.	65